



Undersøgelse af generatorkoncepter til vindmøller - direkte drevet generator til gearløs vindmølle

Søndergaard, Lars; Bindner, Henrik W.

Publication date:
1995

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Søndergaard, L., & Bindner, H. W. (1995). *Undersøgelse af generatorkoncepter til vindmøller - direkte drevet generator til gearløs vindmølle*. Denmark. Forskningscenter Risø. Risø-R No. 801(DA)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

**Undersøgelse af
generatorkoncepter til vindmøller -
Direkte drevet generator
til gearløs vindmølle**

Lars Søndergaard, Henrik Bindner

Risø-R-801(DA)

**Forskningscenter Risø, Roskilde
December 1995**

RISØ BIBLIOTEK

5100051335381



Forord

Rapporten er en del af rapporteringen af END-UVE-projektet: 'Undersøgelse af generatorkoncepter til vindmøller'.

De øvrige rapporter er Bindner, H., L. Søndergaard og E. Damgård: 'Undersøgelse af generatorkoncepter til vindmøller - Opsummeringsrapport', Risø-R-857(DA) og

Damgård, E.: 'Undersøgelse af generatorkoncepter til vindmøller - Besøgsrapporter', Notat nr. EP95/1063, Elsamprojekt.

Nærværende rapport om mangepolede generatorer er en redegørelse om de generatortyper, der kan anvendes i en vindmølle uden gear. Projektets formål var at indsamle erfaringerne samt vurdere resultaterne fra andre projekter om generatorer til gearløse vindmøller for derved at forsøge at finde den/de mest optimale løsning(er). I rapporten er vægten lagt på vindmøller mellem 500kW og 1500kW, fordi det forventes, at det er den størrelse vindmøller, som bliver dominerende i fremtiden.


Først er kravene til transmissionssystemet opstillet. De ydre krav, som omløbstallet for vingerotoren, nettilslutningen og transport sætter grænser for løsningsmulighederne. Udover disse ydre begrænsninger er det vigtigt at transmissionssystemet er simpelt, robust og lydsvagt samt let og billigt og med en høj virkningsgrad. På basis af de ydre krav og de øvrige kriterier gennemgås de forskellige generatortypers anvendelighed mht. anvendelse i gearløse vindmøller.

Udfra undersøgelserne vælges den mest egnede kombination af generator og frekvensomformer til nærmere undersøgelse. Den valgte løsning sammenlignes med den konventionelle gear/generator design. De to koncepters karakteristika sammenlignes mht. størrelse, vægt, virkningsgrad og pris.


Til slut diskuteres valget af bedste løsning samt mulige alternativer til denne. Herunder især anvendelsen af mere eksotiske generatortyper.

Projektet er lavet i samarbejdet med Elsamprojekt, og er delvis financeret af ENS-UVE og delvis af Risø program midler. Elsamsprojekts indsats er financeret af Elsams F&U midler.

Rapporten er gennemlæst og kommenteret af:



Peter Hjuler Jensen, RISØ



Peter Christiansen, ElsamProjekt

ISBN-87-550-2061-5
ISSN-0106-2840

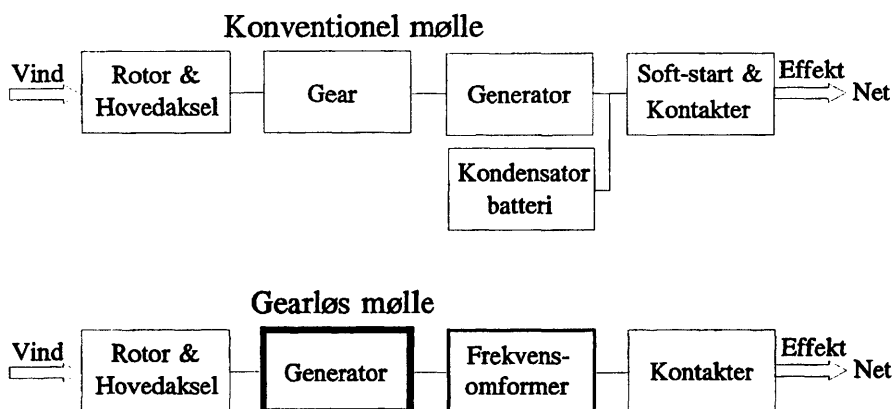
Grafisk Service Risø 1995

Forord	2
1 Indledning	5
2 Krav til transmissionssystemet	6
2.1 Sammenhæng mellem nominel effekt, nominel moment og nominel omløbstal for en vindmølle	6
2.2 Virkningsgraden for drivsystemet til en vindmølle	7
2.3 Nettilslutning	8
2.4 Konstruktionsbegrænsninger ved store generatorer	9
3 Udvælgelse af bedste koncept	12
3.1 Valg af maskintype	12
3.2 Viklet rotor eller permanente magneter	14
3.3 Frekvensomformer	15
4 Analyse af bedste koncept: En synkrogenerator med frekvensomformer	17
4.1 Design kriterier	17
4.2 Fastlæggelse af L/τ og antal polpar p	17
4.3 Skalering af elektriske maskiner	19
4.4 Sammenligning af direkte koblede synkrogeneratorer med 4-polede generatorer med gear	21
4.5 Fremstilling af en mangepolet synkrogenerator	27
4.6 Priser for transmissionssystemet	28
4.7 Diskussion	29
4.8 Alternative løsninger for generatorer til gearløse vindmøller	30
5 Konklusion	32
Referencer	34
A Symbolliste	36
B Magneter	37
C Luftgab	39
D Transport	42
E Virkningsgraden for en mangepolet direkte drevet PM-generator sammenlignet med en 4-polet asynkrogenerator	43
F Beregningsresultater	46

1 Indledning

Den danske vindmølleindustri har til dato satset på kendt og pålidelig teknologi, hvilket har resulteret i, at transmissionssystemet i de fleste dansk producerede vindmøller består af (3-bladet) rotor, hovedaksel, gearkasse, asynkrongenerator og nettilkoblings-enhed. Det er imidlertid interessant med en konstruktion uden gear, da gearløse vindmøller har en række muligheder med hensyn til reduceret vægt og pris, mindre vedligeholdelse og støj samt mere veldefineret levetid.

Drivsystemet fra vind til net for både den konventionelle vindmølle og den gearløse vindmølle er vist skematisk i figur 1.1.



Figur 1.1 Blokdiagram af en vindmølle. Top: En konventionel vindmølle. Bund: En gearløs vindmølle.

Som det kan ses af figur 1.1, er gearkassen og generatoren i den konventionelle vindmølle erstattet af en direkte drevet generator i den gearløse vindmølle. Soft-start enheden i den konventionelle vindmølle benyttes ved indkoblingen af generatoren til elnettet, og det reaktive effektforbrug udkompenseres delvis af et kondensatorbatteri. I den gearløse vindmølle er det mere hensigtsmæssigt at koble generatoren til elnettet via en frekvensomformer, hvorved soft-start enheden og kondensatorbatteriet bliver overflødig.

Det er kun Enercon (D), som kommercielt bygger og sælger gearløse vindmøller, men der foregår både udvikling hos fabrikanterne Kenetech Windpower (USA), Atlantic Orient Corp. (USA), Lagerwey (NL), Belt Electric (DK), Siemens (D) og hos forskningsinstitutioner ECN (NL), Chalmers (S), Rensselaer Polytechnic Institute (USA), Ohio State University (USA), Technische Universität Braunschweig (D), University of Durham (GB) og Nordvestjysk Folkecenter for Vedvarende Energi (DK).

Fabrikanterne og forskningsinstitutionerne arbejder med forskellige koncepter, såsom synkrongenerator med viklet rotor, synkrongenerator med permanente magneter (PM-generatorer), og switched reluktansgeneratorer. I projektet blev erfaringerne fra disse projektet indsamlet og vurderet for derved at forsøge at finde den/de mest optimale løsning/er.

2 Krav til transmissionssystemet

Transmissionssystemet i en vindmølle er underlagt nogle begrænsninger både på input-siden i koblingen til vingerotoren og på output-siden i koblingen til forsyningsnettet. Herudover er der nogle fysiske begrænsninger på generatorens fysiske størrelse, hvis den på simpel vis skal kunne transporteres. For at få et grundlag til at sammenligne gearløse vindmøller med konventionelle vindmøller uden og med frekvensomformere, opstilles nogle kvantitative mål for ydelsen af transmissionssystemet.

2.1 Sammenhæng mellem nominel effekt, nominel moment og nominel omløbstal for en vindmølle

I følge Andersen 1980 er effekten fra en vindmølle givet ved:

$$P = \frac{1}{2} \rho v_0^3 C_p A_{rotor} = 2 \pi \frac{n}{60} m_d \quad (2.1)$$

hvor ρ er luftens massefylde [kg/m^3], v_0 er vindhastigheden [m/s], C_p er effekt-koefficienten, A_{rotor} er det bestrøgne areal [m^2], n er omløbstallet [rpm], og m_d er drejningsmomentet [Nm].

I denne rapport benyttes følgende approksimation:

Det antages, at effektkoefficienten C_p som funktion af vindhastigheden v_0 er uafhængig af vindmøllens størrelse.

Vindmøllernes nominelle effekt kan herefter regnes proportional med det bestrøgne areal, og er givet ved:

$$P_{nom} = k_1 A_{rotor} = k_1 \pi \left(\frac{D_{rotor}}{2} \right)^2 \quad (2.2)$$

$$P_{nom} = 500 \text{ kW} , \quad D_{rotor} = 37 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad k_1 \approx 0.47 \text{ kW/m}^2$$

hvor P_{nom} er den nominelle effekt [kW], D_{rotor} er rotordiameteren [m], og k_1 er vindmøllernes specifikke effekt [kW/m^2].

I formel (2.2) er rotordiameteren valgt til 37m for en 500kW vindmølle, hvilket er en typisk værdi for en konventionel dansk vindmølle (fx. Nordtank NTK 500/37).

For konventionelle vindmøller er tiphastigheden pga. aerodynamisk støj begrænset til ca. 60m/s (fx. 58m/s for Nordtank NTK 500/37). Den maksimale tiphastighed for de gearløse vindmøller er valgt 15% højere (69m/s) end for de konventionelle vindmøller, da volumen af generatoren derved reduceres. Tiphastigheden kan vælges højere for de gearløse vindmøller, fordi der benyttes en frekvensomformer (afsnit 2.3), hvorved omløbstallet og dermed den aerodynamiske støj kan reduceres ved dellast.

Ved indsættelse af tiphastigheden i formel (2.2) fås sammenhængen mellem

vindmøllens nominelle effekt og nominelle omløbstal.

$$v_{tip,nom} = 2\pi \frac{n_{nom}}{60} \frac{D_{rotor}}{2} \Rightarrow$$

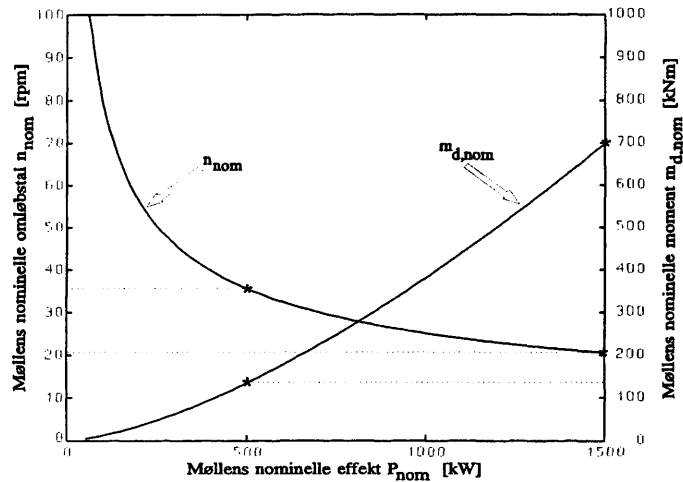
$$P_{nom} = k_1 \pi \left(\frac{D_{rotor}}{2} \right)^2 = k_1 \pi \left(\frac{v_{tip,nom}}{2\pi} \frac{60}{n_{nom}} \right)^2 \quad (2.3)$$

$$\Downarrow$$

$$n_{nom} = 60 \sqrt{\frac{k_1}{P_{nom}}} \frac{v_{tip,nom}}{2\sqrt{\pi}} \approx 60 \sqrt{\frac{0.47 \text{ kW/m}^2}{P_{nom}}} \frac{69 \text{ m/s}}{2\sqrt{\pi}} \approx \frac{794}{\sqrt{P_{nom}}}$$

hvor $v_{tip,nom}$ er tiphastigheden [m/s] ved vindmøllens nominelle omløbstal n_{nom} [rpm].

Formel (2.3) er anvendt i figur 2.1, hvor vindmøllens nominelle omløbstal og momentet er afbildet som funktion af vindmøllens nominelle effekt.



Figur 2.1 Vindmøllens nominelle omløbstal og nominelle moment afbildet som funktion af den nominelle effekt.

Det lave omdrejningstal og dermed store moment er væsentligt for designet af generatoren, idet generatorens volumen er proportional med momentet. Af figur 2.1 ses det, at det nominelle omløbstal for vindmøllen mindskes fra ca. 35.5 rpm til 20.5 rpm, når den nominelle effekt øges fra 500kW til 1500kW, hvorfor det nominelle moment for en vindmølle øges ca. 5 gange (699kNm / 134kNm), når den nominelle effekt øges 3 gange (1500kW / 500kW).

2.2 Virkningsgraden for drivsystemet til en vindmølle

Det samlede virkningsgrad for drivsystemet er en vigtig parameter for vindmøllens økonomi. Det er klart, at hvis der kan opnås en højere virkningsgrad for en gearløs vindmølle (pga. ingen gear og dermed geartab) kontra en konventionel vindmølle, vil dette afhængig af størrelsesordenen kunne være væsentligt for konkurrenceevnen.

2.3 Nettilslutning

Nettilslutningen for en typisk dansk vindmølle med asynkrongenerator består af en tyristorenhed til soft-start og en parallelkoblet kontaktor, hvilket er et enkelt og robust system. Men som det er vist i afsnit 3, er synkrongeneratoren den mest velegnede maskine, som mangepolet direkte drevet vindmøllegenerator. Da den ovenfor nævnte tyristorenhed med tilhørende kontaktor ikke er velegnet til synkrongeneratorer, beskrives nettilslutningen af synkrongeneratorer nedenfor.

Direkte nettilslutning af synkronmaskine

I flere år har forskere i bla. England (Spooners 1994) arbejdet med at lave mangepolede synkrongeneratorer til gearløse vindmøller, som er direkte nettilkøbet. Så vidt det vides har de ikke anvendt dette princip til større effekter ($P_{nom} > 100\text{kW}$) pga. indkoblingsproblemer.

Der er følgende problemer ved at have en synkronmaskine koblet direkte til elnettet:

- 1: det er nødvendig med enten elektrisk eller mekanisk dæmpning, og
- 2: generatoren skal være synkroniseret med elnettet før indkoblingen.

Punkt 1.

En synkrongenerator vil populært sagt virke som en fjeder mellem net og rotor, og for at undgå mekaniske svingninger er det vigtigt at have dæmpning i systemet. Dæmpningen kan enten frembringes elektrisk inde i maskinen eller mekanisk med støddæmper i maskinens ophæng. I følge Siemens Nürnberg (Dr. Georg Möller) vil en elektrisk dæmpning kun være virksom op til nogle få Hz for en stor mangepolet synkrongenerator, hvilket formodentlig er for lavt, når generatoren er direkte nettilsluttet. Englændere (Spooners 1994) anvender mekaniske dæmpning, som i princippet består i at ophænge generatoren i fjedre og støddæmpere. Denne løsning virker kompliceret, og kan være svær at gennemføre pga. følsomheden overfor flexibiliteten og dæmpningsforholdene. Løsningen synes mekanisk kompliceret, og kan derfor ikke tilrådes.

Punkt 2.

Synkroniseringen skal sikre, at synkrongeneratoren først indkobles på nettet, når amplituden, frekvensen og fasen af generatorspændingen og netspændingen er sammenfaldende. Vindmøllens omløbstal og dermed generatorspændingens frekvens og fase kan enten reguleres med pitch-reguleringen (pitch-reguleret vindmølle) eller med en elektrisk modstandsbelastning (stall-reguleret vindmølle). Som direkte nettilkøbet og direkte drevet vindmøllegenerator er PM-generatoren mest velegnet; men for denne generatortype kan amplituden af spændingen ikke reguleres uafhængig af frekvensen, og da tomgangsspændingen ved det nominelle omløbstal samtidig er betydelig større end netspændingen ($\approx 15\%$ for $P=500\text{kW}$) kan der forekomme store indkoblingsstrømstød, hvilket gør synkroniseringen vanskelig.

Direkte nettilslutning beskrives derfor ikke nærmere i denne rapport.

Nettilslutning af synkronmaskine via frekvensomformer

Af de grunde som er beskrevet ovenfor, bør en mangepolet direkte drevet synkrongenerator kobles til elnettet via en frekvensomformer. Herved opnås der flere fordele:

- 1: generatorens diameter kan reduceres, fordi generatoren kan designes til en lavere frekvens end netfrekvensen
- 2: ingen synkroniseringsproblemer,
- 3: færre problemer med svingninger, dæmpning og mekaniske laster pga. variabel hastighed,
- 4: udjævning af hurtige effektvariationer såsom 3-p-effekt pga. variabel hastighed,
- 5: mindre momentpulsationer, hvis vindmøller ikke stall'er eller pitch'er optimalt pga. variabel hastighed
- 6: en forøget årsproduktion på 5% til 10% (Frandsen 1995), fordi den variable hastighed medfører, at vinden kan udnyttes optimalt,
- 7: den aerodynamisk støj fra vingerne kan reduceres, fordi omløbstallet kan mindskes ved lave vindhastigheder, og
- 8: både den aktive og den reaktive effekt kan styres, hvilket burde medføre reducerede krav til nettetskapacitet og dermed besparelser ved nettilslutningen.

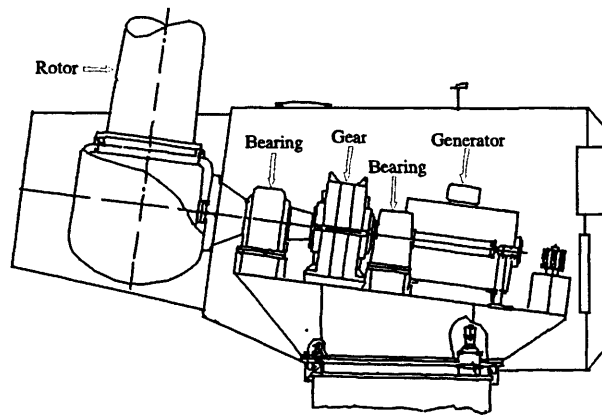
I resten af denne rapport er det derfor antaget, at de mangepolede direkte drevne generatorer er tilkoblet elnettet via frekvensomformere.

2.4 Konstruktionsbegrænsninger ved store generatorer

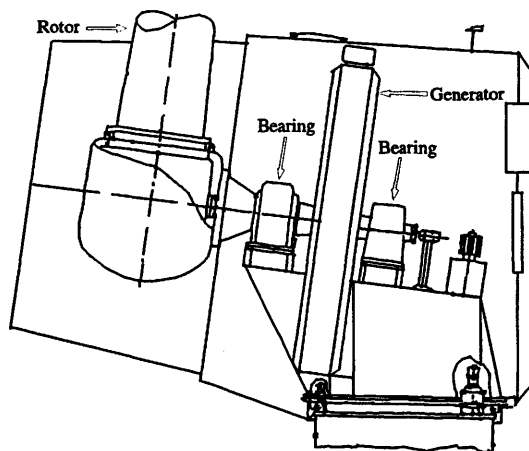
Dette afsnit er medtaget, fordi der er nogle praktiske problemer ved den gearløse vindmølle, som ikke er tilstede ved en konventionel dansk vindmølle.

Maskinkabinen

I figur 2.2 og 2.3 er maskinkabinerne for henholdsvis en 400kW konventionel vindmølle og en tænkt 400kW gearløs vindmølle skitseret.



Figur 2.2 Maskinkabine til en konventionel pitch-reguleret 400kW vindmølle.
Kilde: VESTAS.

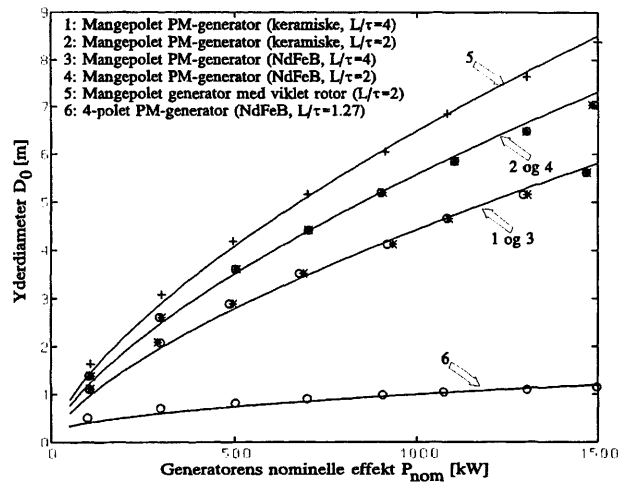


Figur 2.3 Skitse af en tænkt maskinkabine til en 400kW gearløs vindmølle.

Som det ses af figur 2.2 og 2.3 er maskinkabinen til en gearløse vindmølle betydelig større end maskinkabinen til den konventionelle vindmølle. Det betyder, at generatoren kommer til at indgå i den bærende konstruktion på en anden måde, end det er tilfældet med en konventionel vindmølle. Endvidere anskueliggør skitserne at de direkte drevne generatorer til den gearløse vindmølle skal designes, så deres yderdiameter minimeres.

Transport

Da direkte drevne generatorer mellem 500kW og 1500kW er fysisk meget store (kurve 1 til 5 i figur 2.4), er det nødvendigt at tage hensyn til de begrænsninger, der eksisterer mht. transport.



Figur 2.4. Yderdiameteren D_0 for synkrogeneratorer til vindmøller som funktion af den nominelle effekt P_{nom} .

Som det ses af figur 2.4 er yderdiameteren betydelig større for mangepolede direkte drevne generatorer sammenlignet med 4-polede generatorer. Desuden ses det, at yderdiameteren for synkrogeneratoren med viklet rotor er noget større end yderdiameteren for PM-generatorerne.

I følge appendix D kan generatorer transporteres i en container, hvis dens yderdiameter er mindre end 3.0m. Større maskiner kan transporteres på en blokvogn, når yderdiameteren er mindre end 5.0m. Værdierne i tabel 2.1 angiver den maksimale effekt for direkte drevne generatorer, når deres tages hensyn til, at yderdiameteren skal være mindre end henholdsvis 3.0m og 5.0m.

	Mangepolet PM-generator ($L/\tau=4$). Generator 1 og 3 i figur 2.4.	Mangepolet PM-generator ($L/\tau=2$). Generator 2 og 4 i figur 2.4.	Mangepolet generator med viklet rotor ($L/\tau=2$). Generator 5 i figur 2.4.
Yderdiameter ≤ 3.0 m	$P_{nom} \leq 550$ kW	$P_{nom} \leq 400$ kW	$P_{nom} \leq 300$ kW
Yderdiameter ≤ 5.0 m	$P_{nom} \leq 1150$ kW	$P_{nom} \leq 850$ kW	$P_{nom} \leq 650$ kW

Tabel 2.1 Den maksimale effekt for mangepolede direkte drevne generatorer, når yderdiameteren er begrænset af transportmæssige årsager.

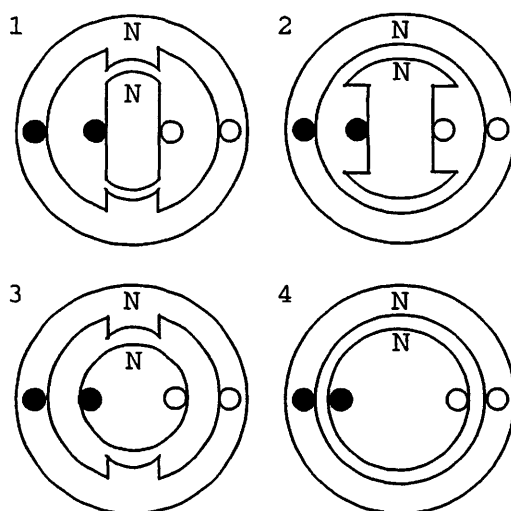
Ud fra værdierne i tabel 2.1 kan det konkluderes, at for de store gearløse vindmøller ($P_{nom} > 750$ kW) kan der opstå transportmæssige problemer pga. generatorens yderdiameter. Fx. over 1150kW er yderdiameteren for en generator til en gearløs vindmølle altid større end 5.0m, og generatoren kan derfor ikke transporteres på sædvanlig vis.

3 Udvalgelse af bedste koncept

Der er igennem tiderne blevet designet elektriske maskiner til mange formål. Fremkomsten af effektelektronik har gjort nogle af maskinerne mindre attraktive (fx. DC-maskinen) og andre mere (fx. SR-maskinen). Nedenfor, hvor forskellige typer af elektriske maskiner er beskrevet, er der lagt vægt på de forhold (fx. holdbarhed, vægt, osv.) der gør sig gældende for en vindmøllegenerator for derved at kunne udvælge den mest velegnede maskintype som direkte drevet vindmøllegenerator.

3.1 Valg af maskintype

Elektriske maskiner kan inddeles i fire hovedtyper, som beskrives i det følgende.



Figur 3.1 Elektriske maskiner. 1: Udprægede poler i stator og rotor. 2: Cylindrisk stator og udprægede poler i rotor. 3: Udprægede poler i stator og cylindrisk rotor. 4: Cylindrisk stator og rotor.

Maskintype 1

Maskintype 1 har både udprægede poler i stator og rotor. Switched Reluctans (SR-maskine) er af denne type, og bliver i tiden undersøgt af forskningsinstitutionerne ECN (NL), Rensselaer Polytechnic Institute (USA) og Ohio State University (USA). Der er stor interesse omkring SR-maskinen, fordi den har en simpel rotor, som kun består af en aksel og noget lamineret blik. Men SR-maskinen har flere uheldige egenskaber f.eks. akustisk støj. Støjen kan reduceres ved at øge luftgabet, men derved øges vægt / effekt forholdet for maskinen, samtidig med at virkningsgraden reduceres. Endvidere har SR-maskinen en lille effektfaktor sammenlignet med andre maskintyper, hvilket betyder, at frekvensomformerens ensretterdel skal være dimensioneret til en noget højere tilsyneladende effekt end aktiv effekt (ca. 40% i følge Miller 1993). SR-maskinen er ikke undersøgt nærmere i dette projekt, fordi støjen og den lave effektfaktor gør den mindre attraktiv end synkronmaskinen som direkte drevet vindmøllegenerator.

Maskintype 2

Maskintype 2 har kun udprægede poler i rotoren. Denne maskintype findes både med

og uden magnetiseringskredsløb (feltvikling eller permanente magneter) i rotoren. Uden magnetiseringskredsløb (synkron reluktans maskine) er maskintype 2 ikke velegnet som mangepolet direkte drevet generator, pga. et højt vægt / effekt forhold og en lille effektfaktor. Maskintype 2 kendes også som synkronmaskine med udprægede poler, hvor magnetiseringskredsløbet enten er en feltvikling (synkron-generator med viklet rotor) eller permanente magneter (PM-generator). Mangepolede synkronmaskiner med viklet rotor fremstilles til adskillige MW, og anvendes bla. i vandkraftværker. Mangepolede PM-maskiner anvendes i dag kun til mindre effekter ($P_{nom} < 200kW$), fordi permanente magneter har været kostbare. Den største mangepolet PM-generator, hvortil der er fundet referencer (Weh 1988), er på 180kW ved 500rpm. Det forventes, at mangepolede PM-maskiner allerede på kort sigt bliver mere udbredte, fordi prisen på magneter er faldende. Hovedparten af denne rapport omhandler mangepolede synkronmaskiner med udprægede poler, fordi det er den mest velegnede generatortype til gearløse vindmøller.

Maskintype 3

Maskintype 3 har kun udprægede poler i statoren. Denne maskintype er kendt som DC-maskinen, og har før i tiden været dominerende til drevsystemer, hvor omløbstallet har skulle kunne varieres. Denne maskintype er ikke velegnet til vindmøller, fordi der skal være elektro-mekanisk kontakt til rotoren (kommutator), hvilket kræver betydelig vedligeholdelse.

Maskintype 4

Maskintype 4 har cylindrisk stator og rotor. Denne maskintype benyttes ofte som 2 eller 4-polet synkrongeneratorer i f.eks. kulfyrede kraftværker. Som mangepolet generator er synkronmaskinen med udprægede poler (maskintype 2) lettere at fremstille og derfor oftere anvendt end synkronmaskinen med cylindrisk rotor.

Asynkronmaskinen, der også er af denne type, er den mest anvendte maskine til effekter over 0.25 kW. Den fremstilles både med viklet rotor (slæberingsmaskine) og med kortslutningsrotor (kortslutningsmaskine). Slæberingsmaskinen er ikke velegnet til vindmøller, fordi børsterne kræver vedligeholdelse.

Kortslutningsmaskinen, som anvendes i konventionelle danske vindmøller, er heller ikke velegnet som mangepolet generator, fordi:

- 1: enten bliver forholdet mellem den nominelle strøm og magnetiseringsstrømmen lille, hvilket medfører lav effektfaktor, dårlig udnyttelse af materialerne og lav virkningsgrad, eller
- 2: også bliver vægt / effekt forholdet stort.

Punkt 1.

Som beskrevet i Krabbe 1993 kan en maskine med 84 polpar og en luftspaltdiameter på 4.2m betragtes som 42 stk. 4-polede maskiner med en luftspaltdiameter på 0.1m, som er placeret langs periferien. En 4-polet maskine med en luftspaltdiameter på 0.1m har normalt en luftgabslængde på ca. 0.6mm. Luftgabslængden for en stor maskine er givet ud fra mekaniske begrænsninger (appendix C), og bør mindst være 4.2mm, når maskinens luftspaltdiameter er 4.2m. Magnetiseringsstrømmen for en 4-polet maskine er normalt ca. 30% af den nominelle strøm. For maskinen med 84 polpar forøges luftgabet mindst $4.2mm/0.6mm \approx 7$ gange, og magnetiseringsstrømmen bliver derfor omtrent " $7 \cdot 0.3 = 2.1$ gange" den nominelle strøm. Denne maskine er ubrugelig, da magnetiseringsstrømmen er større end den nominelle strøm.

Punkt 2.

Magnetiseringsstrømmen kan holdes nede på en passende værdi (30% til 40% af den nominelle strøm) ved at designe generatoren til en lavere frekvens end 50 Hz. Maskinen under punkt 1 kan i princippet realiseres ved at reducere polpar antallet fra 84 til 12. Men som det er beskrevet i afsnit 4.2 øges jernforbruget i både rotor og stator, når poltallet mindskes, da poldelingen derved øges. Som mangepolet generator vil asynkrongeneratoren derfor blive betydelig tungere end synkrongeneratoren.

3.2 Viklet rotor eller permanente magneter

Der er flere forhold, der afgør om det er mest fordelagtigt at anvende en feltvikling eller permanente magneter i en synkrongenerator. Nogle af disse forhold er: Virkningsgraden for generatoren, generatorens fysiske størrelse, plads til magnetiseringskredsløbet og prisen for magnetiseringskredsløbet.

Virkningsgraden for generatoren og generatorens fysiske størrelse

Imodsætning til en PM-generator går der effekt tabt til magnetisering af en generator med viklet rotor, hvilket betyder, at:

- Enten stiger virkningsgraden for en given mangepolet generator, når feltviklingen erstattes af permanente magneter,
- eller også kan PM-generatoren laves med mindre yerdiameter end en maskine med viklet rotor for samme virkningsgrad.
- Desuden er virkningsgraden ved delast større for en PM-generator end for en generator med viklet rotor.

I projektet er det valgt, at designe de mangepolede generatorer med samme virkningsgrad ved fuldlast (appendix F), hvorfor de mangepolede PM-generatorer bliver fysisk mindre end de mangepolede generatorer med viklet rotor.

Plads til magnetiseringskredsløbet og prisen for magnetiseringskredsløbet

I dette afsnit undersøges, hvornår det er plads- og prismæssigt mest attraktivt at anvende permanente magneter fremfor en feltvikling. I følge (Levi, 1984) fylder permanente magneter til magnetiseringen mindre end kobberet til feltviklingen, når:

$$D < \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{E_m p}{\iota B_f k_{cu} J_f} \quad (3.1)$$

og koster mindre, når:

$$D < \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{E_m p}{\iota B_f k_{cu} J_f k_{PMcu}} \quad (3.2)$$

hvor D =luftspaltdiameteren, p =antal polpar, τ =poldelingen, E_m =Magneternes energiindhold i arbejds punktet (appendix B), B_f =Flux-tætheden i luftgabet ($0.6T \leq B_f \leq 0.9T$), J_f =Strømtætheden i feltviklingen ($J_f \leq 5.0A/mm^2$), k_{cu} =Kobberfyldfaktoren ($k_{cu} \approx 0.5$), ι =Spredningskoefficienten ($1.10 \leq \iota \leq 1.25$), og k_{PMcu} =pris pr. m^3 magneter / pris pr. m^3 kobber.

Formel (3.1) og (3.2) er anvendt til udregning af værdierne i tabel 3.1. I udregningerne er $E_m = E_{m,max}$, $J_f = 1.8 \text{ A/mm}^2$ og $\iota = 1.10$.

Magnettype	Keramiske (Hård ferrit)	Keramiske (Hård ferrit)	NdFeB	NdFeB
$E_{m,max} [\text{kJ/m}^3]$	29.4	29.4	236	236
k_{PMCu}	0.86	0.86	20.25	20.25
$B_f [\text{T}]$	0.6	0.8	0.6	0.8
$p=40$. Plads: $D < [\text{m}]$	1.40	1.05	11.05	8.44
$p=40$. Pris: $D < [\text{m}]$	1.62	1.22	0.56	0.42
$p=80$. Plads: $D < [\text{m}]$	2.80	2.10	22.51	16.88
$p=80$. Pris: $D < [\text{m}]$	3.24	2.43	1.11	0.83

Tabel 3.1. Oversigt over hvornår permanente magneter til en PM-generator fylder og koster mindre end kobberet i feltviklingen til en generator med viklet rotor.

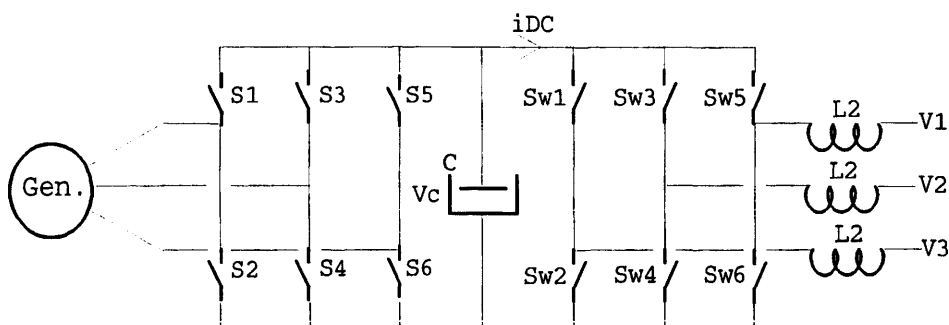
Af tabel 3.1 ses det, at når $p \geq 40$ fylder magneterne (NdFeB) til en PM-generator mindre end en tilsvarende feltvikling, når luftspaltdiameteren blot er mindre end 8.44m, hvilket er en meget stor maskine ($P_{nom} > 1500\text{kW}$).

Det ses også af tabel 3.1, at når luftspaltdiameteren $D \leq 3.24\text{m}$ vil kobberet til feltviklingen koste mindre end de tilsvarende permanente magneter. Men som prisudviklingen har været indenfor permanente magneter vil det formodentlig ændre sig i løbet af nogle år. For bare 10 år siden kostede højeffektive Samarium-Cobolt magneter 10.000 kr/kg, og da dette projekt begyndte i 93 kostede højeffektive NdFeB magneter 2.000 kr/kg. I oktober 94 kostede de samme NdFeB magneter 875 kr/kg, og i maj 95 koster de uofficielt 600 kr/kg, og prisen er stadig faldende.

3.3 Frekvensomformer

Som beskrevet i afsnit 2.3 bør en mangepolet direkte drevet synkrongenerator kobles til elnettet via en frekvensomformer, og derfor beskrives frekvensomformeren kort i dette afsnit.

I det sidste årti er udviklingen forløbet hurtigt mht. pris og ydelse indenfor effektelektronik såvel med hensyn til effektkomponenterne som deres styring. Frekvensomformere med strømmellemkreds og snitstyrede tyristorer (Levi 1984, Weh 1988, Rasmussen 1993, Mohan 1989 og Tremmel 1994) var for bare 10 år siden enerådende over 500 kW. Men udviklingen går i følge fabrikkerne af frekvensomformere mod frekvensomformere med spændingsmellemkreds og pulsbreddestyring (Levi 1984, Miller 1993, Mohan 1989, Pierik 1994 og Tsiolis 1993),



Figur 3.2 Frekvensomformer med spændingsmellemkreds og pulsbreddestyring.

fordi:

- 1: tvangskommuterende halvledere (fx. IGBT=Insulated Gate Bipolar Transistors) er faldet i pris,
- 2: det er lettere at beskytte mod fejl, f.eks. netudfald,
- 3: den høje skiftfrekvens (> 4 kHz) medfører færre overtoner i strømmene,
- 4: generatoren kan udnyttes optimalt under alle driftsforhold, hvorved der spares jern, kobber og evt. permanente magneter,
- 5: motorstart af vindmøllen er muligt,
- 6: frekvensomformeren er en spændingskilde (VSI) og ikke en strømkilde (CSI), hvilket betyder, at store spredningsinduktanser i generatoren kan tolereres, og at der formodentlig ikke nødvendigvis med et elektrisk dæmpekredsløb i generatoren,
- 7: frekvensomformere med spændingsmellemkreds kan parallelkobles, og de kan både anvendes til synkron- og asynkronmaskiner. Dette vil muligvis medføre en pris reduktion i de kommende år, fordi produktionsantallet derved øges, og
- 8: vekselretteren kan desuden både styre den aktive og reaktive effekt.

Virkningsgrad af frekvensomformer

For at kunne sammenligne den konventionelle vindmølle med en gearløse vindmølle er det nødvendigt at kende virkningsgraden for frekvensomformeren. Virkningsgraden ved fuldlast for en frekvensomformer over 150kW med spændingsmellemkreds og IGBT'er er ca. 97.0 % (Anders Agerholm, ABB Industri).

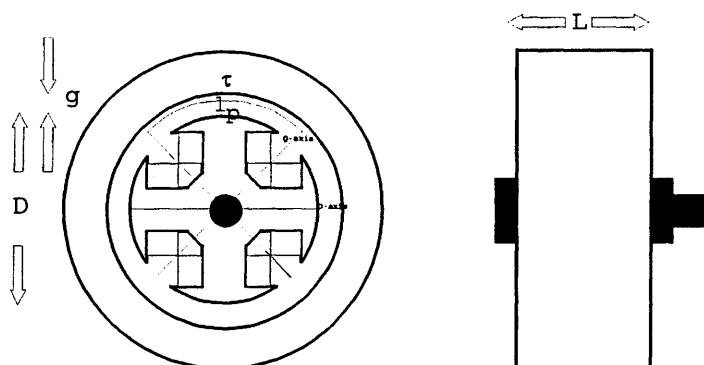
4 Analyse af bedste koncept: En synkron-generator med frekvensomformer

I dette afsnit analyseres det mest lovende koncept til gearløse vindmøller: En mangepolet direkte drevet synkron-generator koblet til elnettet via en frekvensomformer med spændningsmellemkreds og pulsbredestyring. For denne løsning udregnes størrelse, vægt, virkningsgrad ol. i effektområdet 500 kW til 1500 kW.

4.1 Design kriterier

Til sammenligning af en konventionel vindmølle med en gearløs vindmølle undersøges for generatoren dens dimensioner, materiale forbrug og virkningsgrad.

I det følgende benyttes de parametre, som er vist på skitsen af synkrongeneratoren i figur 4.1,

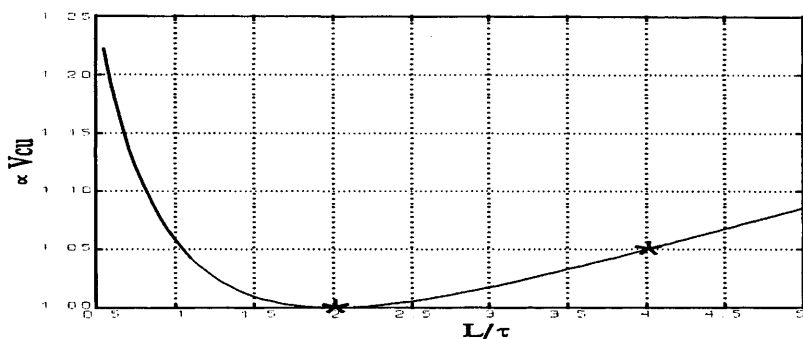


Figur 4.1 Skitse af en 4-polet synkron-generator med udprægede poler og viklet rotor. Statorviklingerne og noterne i statoren er ikke indtegnet.

hvor D =luftspaltdiameteren, L =maskinens aktive længde, p =antal polpar, τ =poldelingen $=D \cdot \pi / (2p)$, l_p =polskobredder $\approx 0.75\tau$ og g =luftgabslængden.

4.2 Fastlæggelse af L/τ og antal polpar p

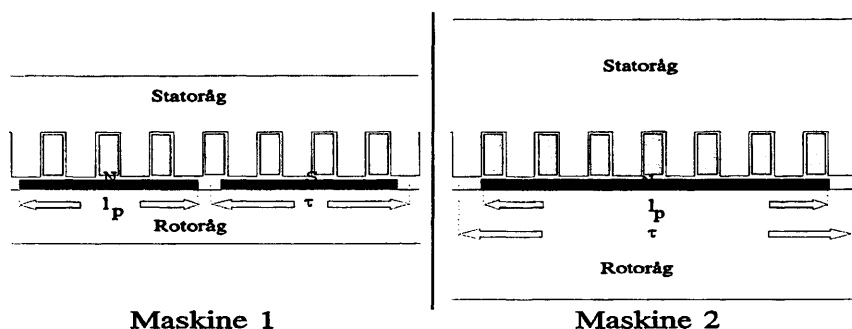
Diameteren, som altid er stor for en mangepolet direkte drevet vindmøllegenerator i sammenligning med en standard asynkron-generator, kan reduceres ved at øge forholdet mellem længden L og poldelingen τ . Dette forhold kan dog ikke gøres vilkårligt stort, fordi kobberforbruget derved stiger, hvilket er vist i figur 4.2.



Figur 4.2 Kobbervolumen V_{cu} som funktion af forholdet mellem længden L og poldelingen τ .

Det ses af figur 4.2, at for fastholdt polpar antal p og nominel effekt P_{nom} bliver kobbervolumet V_{cu} mindst, når $L/\tau=2$. Men da kurven for kobbervolumenet er forholdsvis flad omkring minimum, kan L/τ godt vælges op til 4, uden at kobbervolumen øges væsentlig.

Diameteren kan også reduceres ved at reducere polpar antallet og dermed statorfrekvens. Men når polpar antallet reduceres stiger jernforbruget og dermed vægten også.



Figur 4.3 Udsnit af rotor og stator til PM-generatorer hvor polpar antallet i maskine 2 er halv så stor som i maskine 1.

Dette er forsøgt illustreret i figur 4.3, hvor der er vist to maskiner med samme luftspaltdiameter D og aktiv længde L , men polpar antallet p er halveret i maskine 2 i forhold til maskine 1. Derved fordobles poldelingen τ , hvilket øger arealet af stator- og rotoråget og dermed volumen af stator- og rotorblikket.

På den anden side skal statoråget altid have et vis højde, for at det overhovedet er muligt at bygge store elektriske maskiner. I følge Schorch (Ing. Meyer) skal statoråget være mindst 5-6 cm, når luftspaltdiameteren er over 2.0m, fordi det da er nødvendigt at sammensætte statoren af mindre sektioner. Dette kriterium er anvendt i denne rapport til at fastlægge statorfrekvensen og dermed polpar antallet. Simuleringerne viste, at statoråget bliver omtrentlig 5-6 cm for en direkte drevet vindmøllegenerator, når den nominelle statorfrekvens er 25 Hz.

4.3 Skalering af elektriske maskiner

Skalering er en undersøgelse af, hvordan en række parametre i en elektrisk maskine varierer, når luftspaltdiameteren øges ϵ gange fra D_1 til D_2 . Skaleringen er medtaget, fordi de forhold, der gælder for maskiner med konstant omløbstal, ikke gælder for en direkte drevet vindmøllegenerator, hvor omløbstallet reduceres for stigende effekt.

I skaleringen skelnes der mellem hurtigløbende maskiner (2 og 4-polet) og mangepolede direkte drevne maskiner. De hurtigløbende maskiner har i det følgende intet index, og de mangepolede direkte drevne maskiner har index 1.

Den nominelle værdi for statorfrekvensen ($f_{s,nom} = p \cdot n_{nom} / 60$) er holdt konstant uafhængig af den nominelle effekt, og er valgt til henholdsvis 50Hz for de hurtigløbende maskiner og 25Hz for de mangepolede maskiner (Afsnit 4.2).

L/τ er valgt til 1.27 for de hurtigløbende maskiner, fordi deres aktive længde L derved bliver lig luftspaltdiameteren D . For de mangepolede direkte koblede vindmøllegeneratorer bør L/τ vælges mellem 2 og 4 (Afsnit 4.2), hvorfor der både er vist simuleringsresultater for maskiner, hvor L/τ er lig 2, og for maskiner hvor L/τ er lig 4.

Luftgabslængden er i følge appendix C valgt til $g = D/1000$ for de direkte drevne maskiner og til $g \approx 2 \cdot 10^{-4} + D/250$ for de hurtigløbende maskiner, hvor både luftspaltdiameteren D og luftgabslængden g er i meter.

Det antages, at blikket udnyttes lige meget i alle maskiner, og at flux-tætheden i luftgabet ikke kan hæves vilkårligt pga. mætning.

Maskinerne A og A_1 er, som det er foreslået i Krabbe 1993, skaleret lineært, hvilket betyder, at forholdet mellem længderne L_2 og L_1 er givet ved $L_2/L_1 = D_2/D_1 = \epsilon$. Som det er nævnt ovenfor, ønskes der uafhængig af maskinens effekten den samme flux-tæthed B_f i luftgabet, hvilket klares ved at vælge strømtætheden $J_2/J_1 = \epsilon^{-1}$ for maskinerne A og A_1 .

Af tabel 4.1 ses det, at for den direkte drevne generator A_1 afhænger L/τ af effekten ($L_2/\tau_2 / L_1/\tau_1 = \epsilon$), hvilket er urealistisk i praksis, og derfor er maskinerne B og B_1 også medtaget. For maskinerne B og B_1 holdes både B_f , J og L/τ konstant, og der justeres istedet på mængden af jern og kobber.

	Mask. A	Mask. A ₁	Mask. B	Mask. B ₁
Luftgabsdiameter D_2/D_1	ϵ	ϵ	ϵ	ϵ
Strømtætheden J_2/J_1	ϵ^{-1}	ϵ^{-1}	1	1
Luftgabslængden g_2/g_1	ϵ	ϵ	ϵ	ϵ
Statorfrekvensen f_{s2}/f_{s1}	1	1	1	1
Omløbstal n_2/n_1	1	ϵ^{-1}	1	$\epsilon^{-3/4}$
Antal polpar p_2/p_1	1	ϵ	1	$\epsilon^{3/4}$
Poldelingen τ_2/τ_1	ϵ	1	ϵ	$\epsilon^{1/4}$
$(L_2/\tau_2) / (L_1/\tau_1)$	1	ϵ	1	1
Længden L_2/L_1	ϵ	ϵ	ϵ	$\epsilon^{1/4}$
Borevolumen $V_{\text{bore}2}/V_{\text{bore}1}$	ϵ^3	ϵ^3	ϵ^3	$\epsilon^{9/4}$
Kobbervolumen $V_{\text{CU}2}/V_{\text{CU}1}$	ϵ^3	$\epsilon^2 < .. < \epsilon^3$	ϵ^2	$\epsilon^{5/4}$
Jernvolumen $V_{\text{FE}2}/V_{\text{FE}1}$	ϵ^3	ϵ^2	ϵ^3	$\epsilon^{5/4}$
Magnetvolumen $V_{\text{m}2}/V_{\text{m}1}$	ϵ^3	ϵ^3	ϵ^3	$\epsilon^{9/4}$
Flux-tætheden B_2/B_1	1	1	1	1
Strømbelægningen K_2/K_1	1	1	1	1
Modstanden R_2/R_1	ϵ^{-1}	$\epsilon^{-2} < .. < \epsilon^{-1}$	1	$\epsilon^{-3/4}$
Strømmen I_2/I_1	ϵ	ϵ	ϵ	ϵ
Kobbertabet $P_{\text{CU}2}/P_{\text{CU}1}$	ϵ	$1 < .. < \epsilon$	ϵ^2	$\epsilon^{5/4}$
Overflade arealet A_2/A_1	ϵ^2	ϵ^2	ϵ^2	$\epsilon^{5/4} < .. < \epsilon^2$
Periferihastigheden v_2/v_1	ϵ	1	ϵ	$\epsilon^{1/4}$
Flux pr. pol Ψ_2/Ψ_1	ϵ^2	ϵ	ϵ^2	$\epsilon^{1/2}$
Polhjulspændingen E_2/E_1	ϵ^2	ϵ	ϵ^2	$\epsilon^{1/2}$
Effekten P_2/P_1	ϵ^3	ϵ^2	ϵ^3	$\epsilon^{3/2}$
$(P_{\text{CU}2}/P_2) / (P_{\text{CU}1}/P_1)$	ϵ^{-2}	$\epsilon^{-2} < .. < \epsilon^{-1}$	ϵ^{-1}	$\epsilon^{-1/4}$
$(A_2/P_{\text{CU}2}) / (A_1/P_{\text{CU}1})$	ϵ	$\epsilon < .. < \epsilon^2$	1	$1 < .. < \epsilon^{3/4}$
$(V_{\text{CU}2}/P_2) / (V_{\text{CU}1}/P_1)$	1	$1 < .. < \epsilon$	ϵ^{-1}	$\epsilon^{-1/4}$
$(V_{\text{FE}2}/P_2) / (V_{\text{FE}1}/P_1)$	1	1	1	$\epsilon^{-1/4}$
$(V_{\text{m}2}/P_2) / (V_{\text{m}1}/P_1)$	1	ϵ	1	$\epsilon^{3/4}$

Tabel 4.1. I tabellen er det vist, hvordan en række parametre ændres, når generatorens luftgabsdiameter D skales ϵ gange ($D_2 = \epsilon D_1$). A og B er hurtigløbende generatorer, og A_1 og B_1 er mangepolede direkte drevet generatorer til vindmølle.

I tabel 4.1 betyder $< .. <$, at værdien ligger imellem de angivne værdier. Fx. for maskinen B_1 er: $\epsilon^{5/4} < A_2/A_1 < \epsilon^2$, hvilket betyder at, overflade arealet A_2/A_1 ligger mellem $\epsilon^{5/4}$ og ϵ^2 afhængig af maskinens effekt.

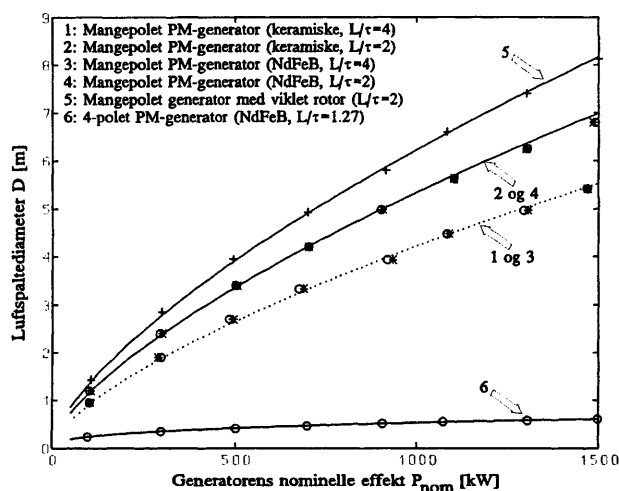
Resultaterne fra tabel 4.1 er anvendt i afsnit 4.4. til at give en kvalitativ sammenligning af gear/generator løsningen med den gearløse løsning.

4.4 Sammenligning af direkte koblede synkrongeneratorer med 4-polede generatorer med gear

I sammenligningen er der lagt vægt på den fysiske størrelse, virkningsgraden, vægten og kølingen, fordi det er væsentlige faktorer for et transmissionssystem til en vindmølle. De værdier, som ligger til grund for de efterfølgende grafer forefindes i appendix F, hvor dimensioneringen af generatorerne er foretaget.

Luftspaltdiameter og den aktive længde af vindmøllegeneratorer

Luftspaltdiameterne for maskinerne B og B₁ er i figur 4.4 skitseret som funktion af den nominelle effekt.

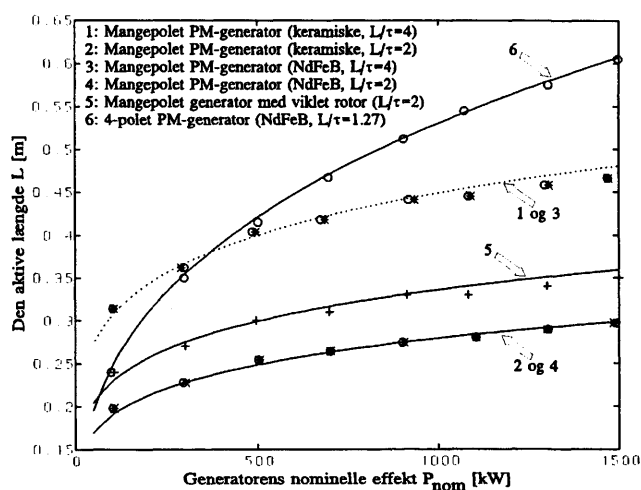


Figur 4.4 Luftspaltdiameteren D som funktion af den nominelle effekt P_{nom} .

De fuld optrukne linjer er dem, som skaleringen giver, og cirklerne/stjerneerne er værdier for generatorer, som er designet med Matlab og PC-programmet PSYN. PSYN er udviklet i 1994 af tidl. professor, doktor Ulrik Krabbe.

I følge figur 4.4 ligger luftspaltdiameteren mellem 2.7m ($L/\tau=4$) og 3.4m ($L/\tau=2$) for en 500kW mangepolet PM-generator til en gearløs vindmølle. Til sammenligning er luftspaltdiameteren for en 500kW direkte drevet synkrongenerator med viklet rotor ca. 4m. Ved 1500kW er luftspaltdiameteren mellem 5.4m ($L/\tau=2$) og 6.8m ($L/\tau=4$) for PM-generatorerne, hvorimod den er ca. 8.0m for en direkte drevet synkrongenerator med viklet rotor. Som det også er nævnt tidligere i denne rapport, er det af transportmæssige grunde en fordel at vælge en PM-generator fremfor en generator med viklet rotor.

Generatorernes aktive længde er vist i figur 4.5 som funktion af den nominelle effekt.



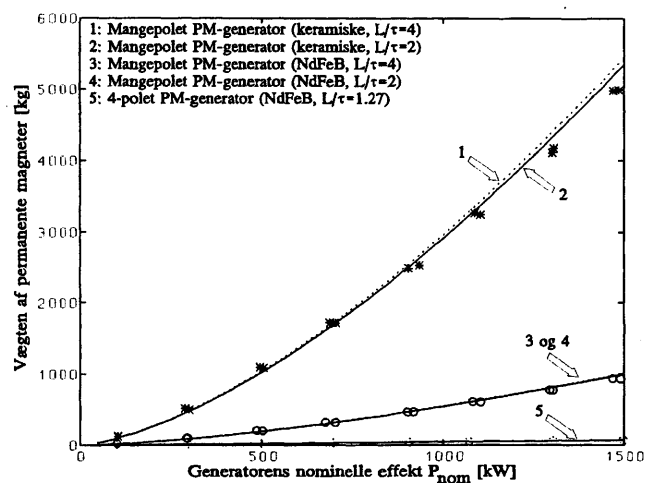
Figur 4.5 Den aktive længde L for vindmøllegeneratorer som funktion af den nominelle effekt P_{nom} .

Det ses af figur 4.5, at den aktive længde er mindre end 0.65m for alle generatorer, hvorfor den imodsætning til diameteren ikke burde give nogle transport- eller produktionsmæssige problemer.

Materialeforbrug til generatorerne

Af tabel 4.1 ses endvidere, at for de to hurtigløbende maskiner A og B er volumen af magneterne proportional med effekten (A: og B: $V_{m2}/P_2 / V_{m1}/P_1 = 1$). For de mangepolede direkte drevne vindmøllegeneratorer A_1 og B_1 vokser volumen af magneterne hurtigere end effekten (A_1 : $V_{m2}/P_2 / V_{m1}/P_1 = \epsilon$ og B_1 : $V_{m2}/P_2 / V_{m1}/P_1 = \epsilon^{3/4}$).

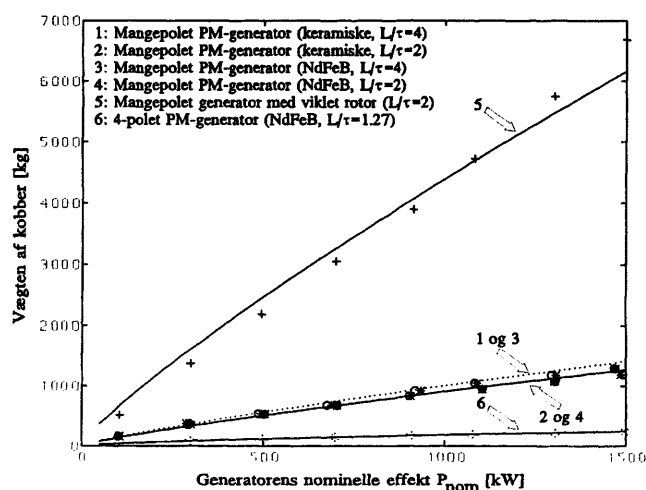
Som funktion af effekten er magnetvolumenet skitseret i figur 4.6 for en 4-polet PM-generator (maskintype B) og for de mangepolede direkte drevne PM-generatorer til vindmøller (maskintype B_1).



Figur 4.6 Magnetforbruget som funktion af den nominelle effekt P_{nom} .

Af figur 4.6 ses det, at når effekten øges, stiger mængden af magnetmaterialer hurtigere for en direkte drevet PM-generator til vindmøller end for en 4-polet PM-generator. En direkte drevet PM-generator til vindmøller er derfor mest velegnet til mindre vindmøller, når der kun ses på prisen af magneterne. Det skyldes, at forbruget af de relative kostbare magneter vokser kraftig med effekten.

I figur 4.7 er kobberforbruget vist som funktion af effekten for en 4-polet PM-generator og for de mangepolede direkte drevne synkrongeneratorer til vindmøller.

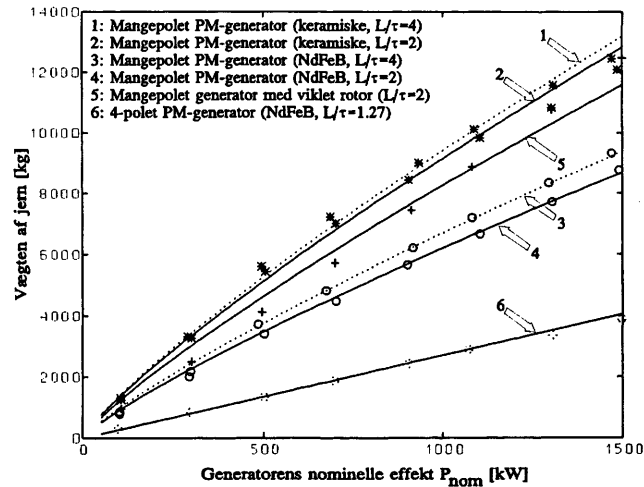


Figur 4.7 Kobberforbruget som funktion af den nominelle effekt P_{nom} .

Det ses, at kobberforbruget til en mangepolet direkte drevet generator med viklet rotor er betydelig større end kobberforbruget til en mangepolet direkte drevet PM-generator. Vægten af kobberet til en mangepolet direkte drevet generator med viklet rotor svarer omtrent til den samlede vægt af magneter plus kobber til en mangepolet direkte drevet

PM-generator med keramiske magneter.

Jernforbruget til generatorerne er vist som funktion af effekten i figur 4.8.



Figur 4.8 Jernforbruget som funktion af den nominelle effekt P_{nom} .

Det ses, at forbruget af jern til en mangepolet direkte drevet PM-generator med keramiske magneter er noget større (≈ 3 tons ved 500kW) end jernforbruget til en mangepolet direkte drevet PM-generator med NdFeB-magneter. En mangepolet direkte drevet PM-generator med keramiske magneter bliver derfor betydelig tungere end en mangepolet direkte drevet generator med NdFeB-magneter, fordi der både bruges mere magnetmateriale og mere jern. En mangepolet direkte drevet generator med viklet rotor er pga. af kobbevægten også betydelig tungere end en mangepolet direkte drevet PM-generator med NdFeB-magneter.

Vægten af transmissionssystemet

Vægten af transmissionssystemet er vigtig, fordi det har betydning for dimensioneringen af resten af vindmøllen, og fordi prisen på vindmøllen tildels afhænger af matrialeforbruget.

Vægten for transmissionssystemet bestående af en asynkrongenerator og et gear er oplyst af fabrikanterne (ABB og Flender), hvorimod der er nogen usikkerhed på beregningen af vægten for de mangepolede direkte drevne synkrongeneratorer.

	4-polet 500kW asynkrongenerator	Mangepolet 500kW generator med viklet rotor	Mangepolet 500kW PM- generator (Keramiske)	Mangepolet 500kW PM- generator (NdFeB)
Vægt generator [kg]	2200	11000	11000	7000
Vægt gear [kg]	5800			
Vægt total [kg]	8000	11000	11000	7000

Tabel 4.2. Vægten af transmissionssystemerne til en 500kW konventionel vindmølle og til en 500kW gearløs vindmølle.

Ud fra de angivne vægte i tabel 4.2 forventes det, at til en 500kW vindmølle vil en 4-polet asynkrongenerator med gear være henholdsvis lettere end en mangepolet direkte drevet PM-generator med keramiske magneter og en mangepolet direkte drevet synkrongenerator med viklet rotor og tungere end en mangepolet direkte drevet PM-generator med NdFeB-magneter.

	4-polet 1500kW asynkrongenerator	Mangepolet 1500kW generator med viklet rotor	Mangepolet 1500kW PM- generator (Keramiske)	Mangepolet 1500kW PM- generator (NdFeB)
Vægt generator [kg]	5900	40000	40000	30000
Vægt gear [kg]	11200			
Vægt total [kg]	17100	40000	40000	30000

Tabel 4.3. Vægten af transmissionssystemerne til en 1500kW konventionel vindmølle og til en 1500kW gearløs vindmølle.

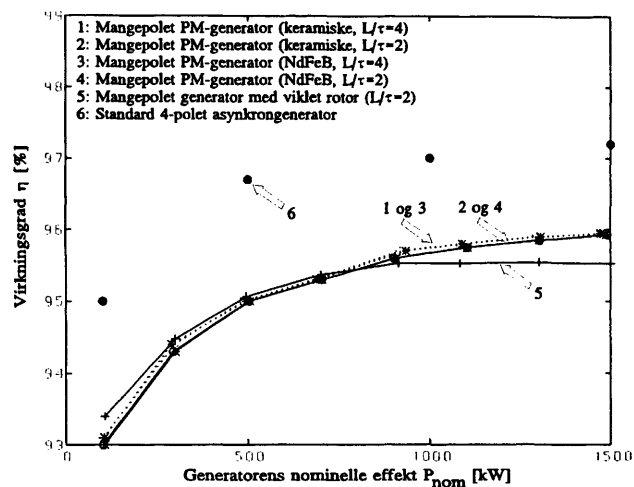
Af tabel 4.3 ser det ud til, at for en 1500kW vindmølle bliver vægten for et transmissionssystem uden gear noget tungere end et konventionel transmissionssystem. Vægtmæssigt bliver det derfor mindre og mindre attraktivt at anvende det gearløse koncept fremfor gear/generator løsningen, når effekten øges.

Virkningsgraden for transmissionssystemet

Normalt siges det, at store maskiner har en høj virkningsgrad, hvilket også er korrekt for maskiner, hvor omdrejningstallet er konstant (fx. 1500rpm) uafhængig af maskinens nominelle effekt. Men, som det er vist i dette afsnit, er forholdet noget anderledes for en mangepolet direkte drevet vindmøllegenerator, fordi omløbstallet reduceres for stigende nominel effekt.

Af tabel 4.1 ses det, at forholdet mellem kobbertabet og den nominelle effekt (P_{Cu2}/P_2) / (P_{Cu1}/P_1) aftager med ϵ^{-1} for de hurtigløbende maskiner B og med $\epsilon^{-1/4}$ for de mangepoledede direkte drevne vindmøllegeneratorer B₁. Da eksponenten er mindre for maskintype B end for maskintype B₁ er det lettere at opnå en høj virkningsgrad for en 4-polet generator end for en mangepolet direkte drevet vindmøllegenerator.

I figur 4.9 er virkningsgraden ved fuldlast vist som funktion af den nominelle effekt, når generatoren er belastet med en ren ohmsk belastning ($\cos\varphi=1$).



Figur 4.9 Virkningsgraden som funktion af den nominelle effekt for en 4-polet asynkrongenerator og for de mangepoledede direkte drevne synkrongeneratorer.

Af figur 4.9 ses det, at for generatorer over 500kW er virkningsgraden ved fuldlast ca. 1.5% højere for en standard 4-polet asynkrongenerator end for en mangepolet direkte drevet vindmøllegenerator. Det ses også, at virkningsgraden for en mangepolet direkte drevet PM-generator til vindmøller er uafhængig af L/τ .

Herefter undersøgte virkningsgraden fra hovedakslen til forsyningsnettet. I den konventionelle vindmølle skal tabet i gearet medregnes, og i den gearløse vindmølle skal tabet i frekvensomformereren medregnes. Disse tab er medtaget i tabel 4.4, hvor der er angivet virkningsgraden for fire typer transmissionssystemer.

	4-polet 500kW asynkron- generator	Mangepolet 500kW generator med viklet rotor	Mangepolet 500kW PM- generator (Keramiske)	Mangepolet 500kW PM- generator (NdFeB)
Virkningsgrad generator [%]	96.7	95.1	95.0	95.0
Virkningsgrad gear [%]	97.5			
Virkningsgrad frekvensomf. [%]	(97.0)	97.0	97.0	97.0
Virkningsgrad total [%]	94.2 (91.2)	92.1	92.0	92.0

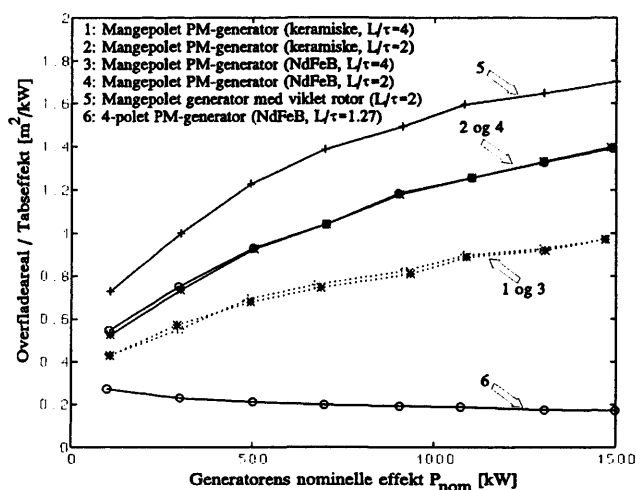
Tabel 4.4. Virkningsgraden for transmissionssystemerne til en 500kW konventionel vindmølle og til en 500kW gearløs vindmølle. Værdierne i parenteser er for en "konventionel" vindmølle, som er koblet til elnettet via en frekvensomformer.

Fuldlast virkningsgraden for transmissionssystemet til en konventionel vindmølle er ca. 94.2%, hvilket er ca. 2% højere end virkningsgraden for transmissionssystemet til en gearløs vindmølle. Ved høje vindhastigheder kan dette medføre, at virkningsgraden for en gearløs vindmølle bliver mindre end virkningsgraden for en konventionel vindmølle. Men, som det er beskrevet i appendix E, er forholdene omvendt ved reduceret last.

Af tabel 4.4 ses også, at hvis en 500kW konventionelle vindmølle kobles til elnettet via en frekvensomformer bliver fulldast virkningsgraden for dette transmissionssystem (gear, generator og frekvensomformer) ca. 1% lavere end virkningsgraden for et transmissionssystem til en gearløs vindmølle.

Kølingen af vindmøllegeneratorer

For store lukkede maskiner, hvor der ikke anvendes forceret køling, er det ofte problematisk at udnytte materialerne optimalt pga. manglende kontrolleret køling. Køleproblemerne er formodentlig mindre for en mangepolet direkte drevet vindmøllegenerator end for en hurtigløbende generator. Årsagen til dette er, at for en generator til en gearløs vindmølle stiger overfladearealet hurtigere end kobbertabet ($B_1: 1 < A_2/P_{CU2} / A_1/P_{CU1} < \epsilon^{3/4}$), når effekten øges, hvilket ikke er tilfældet for en hurtigløbende generator ($B: A_2/P_{CU2} / A_1/P_{CU1} = 1$). Dette er også vist i figur 4.10, hvor forholdet mellem overfladearealet og tabet (kobbertab + jerntab) er indtegnet som funktion af den nominelle effekt.



Figur 4.10 Forholdet mellem overfladeareal og tabseffekt som funktion af den nominelle effekt P_{nom} .

Af figur 4.10 ses det også, at forholdet mellem overfladearealet og tabet reduceres, når L/τ øges fra 2 til 4. Dette er endnu en grund til ikke at vælge L/τ større end 4, da kølingen ellers kan blive for dårlig.

4.5 Fremstilling af en mangepolet synkrongenerator

En mangepolet synkronmaskine i størrelsen 500kW-1500kW er væsentlig anderledes at fremstille end en konventionel asynkrongenerator. Der er to ting der primært adskiller de to generatortyper.

- For det første er en mangepolet direkte drevet synkronmaskine til vindmøller fysisk stor. Dette gør, sammen med de seriestørrelser der kan forventes, at fremstillingen vil være præget af manuelt arbejde i modsætning til asynkronmaskiner, der i høj grad fremstilles på automatiserede produktionslinjer.

- For det andet er anvendelsen og håndteringen af permanente magneter. Der er flere måder, hvorpå de kan håndteres. Ved keramiske magneter kræves der fluxforstærkning for at få tilstrækkelig flux-tæthed i luftgabet, og det er derfor ikke muligt at opmagnetisere magneterne efter, at de er monteret i rotoren. Magneterne kan istedet monteres ved at skubbe dem ind i rotoren efter, at den er monteret i statoren. Denne teknik anvendes bla. af Belt Electric. For maskiner med højeffektive magneter (fx. NdFeB) er det muligt at undvære fluxforstærkning, og magneterne kan derfor limes fast på overfladen af rotoren. På disse maskiner kan magneterne opmagnetiseres efter, at de er limet fast. Derved bliver det betydelig lettere at arbejde med magneterne. Hvis der anvendes fluxforstærkning gælder de samme bemærkninger som for de keramiske magneter.

Uanset om der anvendes keramiske magneter, NdFeB-magneter eller en viklet rotor, vil der altid være et stort indhold af manuelt arbejde forbundet ved fabrikationen af en mangepolet direkte drevet vindmøllegenerator i sammenligning med en standard asynkrongenerator.

4.6 Priser for transmissionssystemet

kWh-prisen er afgørende for om det er rentabelt at skifte fra gear/generator løsningen til en mangepolet direkte drevet synkrongenerator med frekvensomformer. Prisen for transmissionssystemet er væsentlig for kWh-prisen, og der er derfor indhentet omtrentlige priser fra fabrikanten af generatorer, gear og frekvensomformere. **Alle priser er i 1994 DKK, og de skal tages med forbehold, da der ikke er foregået en egentlig forhandling.** Specielt er prisen for den direkte drevte generator usikker, fordi det pt. kun er Enercon, som fremstiller direkte drevne vindmøllegeneratorer over 100kW, og sælger kun vindmøller og ikke generatorer.

500kW 4-polet asynkrongenerator	125.000 kr.
Gear til en 500kW vindmølle	325.000 kr.
Kondensatorbatterier + soft-start tyristorer	25.000 kr.
4-polet asynkrongenerator + gear til en 500kW vindmølle	475.000 kr.
Direkte drevet 500kW PM-generator til gearløs vindmølle	625.000 kr.
Frekvensomformere til en 500kW PM-generator	375.000 kr.
Direkte drevet PM-generator og frekvensomformer til en 500kW vindmølle	1.000.000 kr.
Prisforskel mellem 4-polet asynkrongenerator + gear og direkte drevet PM-generator + frekvensomformer til 500kW vindmøller	525.000 kr.
Frekvensomformer til en 500kW 4-polet asynkrongenerator	375.000 kr.
4-polet asynkrongenerator + gear + frekvensomformer til en 500kW vindmølle	825.000 kr.
Prisforskel mellem 4-polet asynkrongenerator + gear + frekvensomformer og direkte drevet PM-generator + frekvensomformer til 500kW vindmøller	175.000 kr.

Tabel 4.5. Priserne for transmissionssystemer til 500kW vindmøller.

Tabel 4.5 viser, at for en 500kW vindmølle er det ikke umiddelbart økonomisk fordelagtigt at erstatte gearet og asynkrongeneratoren med en direkte drevet PM-

generator med en tilhørende frekvensomformer pga. mer prisen på 525.000 kr.

Den gearløse vindmølle i tabel 4.5 kan uden ekstra omkostninger køre med variabelt omdrejningstal (pga. frekvensomformer), hvilket ikke er tilfældet for en konventionel vindmølle. Da den internationale udvikling går mod vindmøller med variabelt omdrejningstal (Kenetech Windpower (USA), Markham (UK), Floda, Enercon (D), Lagerwey (NL)) er prisen for en mangepolet direkte drevet PM-generator + frekvensomformer til en gearløs vindmølle også sammenlignet med prisen for et gear + asynkrongenerator + frekvensomformer til en "konventionel" vindmølle. Af tabel 4.5 ses det, at til en 500kW vindmølle er transmissionssystemet til den gearløse kun ca. 175.000 kr. dyrere end transmissionssystemet til en "konventionel" vindmølle med variabelt omdrejningstal.

I tabel 4.5 er der anvendt samme pris for frekvensomformer til asynkrongeneratoren og til PM-generatoren, fordi det forventes, at der vil blive benytte samme type frekvensomformer til de to generatortyper (afsnit 3.3).

Prisforskellen mellem PM-generatorer og en generator med viklet rotor

I appendix F er priserne udregnet for de aktive materialer (jern, kobber og magneter) til de mangepoledede direkte drevne vindmøllegeneratorer.

	PM-genera- tor kerami- ske magne- ter ($L/\tau=2$)	PM-genera- tor kerami- ske magne- ter ($L/\tau=4$)	PM-genera- tor NdFeB magneter ($L/\tau=2$)	PM-genera- tor NdFeB magneter ($L/\tau=4$)	Generator med viklet rotor ($L/\tau=2$)
$P_{\text{drev}} = 500 \text{ kW}$	135026	137381	229848	237140	117740
$P_{\text{drev}} = 1500 \text{ kW}$	446763	453450	943050	956565	358710

Tabel 4.6. Priser for de aktive materialer til de mangepoledede direkte drevne vindmøllegeneratorer. Der er anvendt materiale priser fra 1994.

Omkostningerne til statorhuset, lejerne, akslen, forbindelsen mellem akslen og rotorens magnetisk aktive dele, arbejds løn, fortjeneste, etc. skal lægges til prisen for de aktive materialer for at få den samlede pris for generatoren. Priserne for de aktive materialer giver dog en idé om generatorens totale pris. Ud fra tabel 4.6 ser det derfor ud til, at PM-generatorerne med NdFeB-magneter vil pt. koste mere end de to andre generatortyper. Desuden ser det af tabel 4.6 ud til, at prisforskel mellem generatoren med viklet rotor og PM-generatoren med keramiske magneter vil være beskednen.

4.7 Diskussion

Der er formodentlig to grunde til, at Enercon har valgt en generator med viklet rotor istedet for en PM-generator:

- 1: Produktionsteknikken er velkendt fra direkte drevne generatorer til vandkraftværker,
- 2: permanente magneter har været kostbare, og
- 3: der kan benyttes en simplere frekvensomformer, fordi den inducerede spændingen kan styres med magnetiseringsstrømmen.

Men det ser ud til, at PM-generatoren er fremtidens generator til gearløse vindmøller,

fordi yderdiameteren er mindre, og virkningsgraden er højere ved dellast. Desuden bliver magnetmaterialer formodentlig billigere, hvilket formodentlig ikke er tilfældet for jern og kobber.

Som det også er påpeget i afsnit 4.6 skal priserne i tabel 4.5 tages med nogen forbehold. Men af tabel 4.5 kan det dog konkluderes, at den direkte drevet vindmøllegenerator med tilhørende frekvensomformer til en 500kW gearløs vindmølle skal koste mindre end 825.000 kr. for at være billigere end transmissionssystemet til en "konventionel" vindmølle med tilhørende frekvensomformer.

4.8 Alternative løsninger for generatorer til gearløse vindmøller

Udover den her betragtede løsning: En mangepolet synkrogenerator (radialflux) med tilhørende frekvensomformer, er der en række andre muligheder. Det drejer sig primært om transversalfluxmaskiner.

Referencerne Weh 1988 og Weh 1991 påpeger, at til vindmøller er det muligt at lave transversalfluxmaskinen lettere og mere kompakte end radialfluxmaskinen. Men produktionsomkostningerne er i følge Siemens Nürnberg (Dr. Georg Möller) imidlertidig betydelig højere end for en tilsvarende radialfluxmaskine. Endvidere er der også en række spørgsmål der ikke er besvaret i forbindelse med konstruktionen og fremstillingen af disse maskiner. Fx. i referencerne Weh 1988 og Weh 1991 benyttes designbetingelser (fx. højere omløbstal), som ikke passer til danske vindmøller.

Et andet alternativ er at anvende flere mindre maskiner istedet for een stor. Dette kan enten realiseres ved mekanisk at koble flere maskiner sammen eller ved at opbygge maskinen i "stages" (flere statorer ved siden af hinanden i samme statorhus). I tabel 4.6 er det vist, hvilke konsekvenser det har for en 1500kW gearløs vindmølle, at anvende 5 stk. generatorer, som normalt benyttes i en 500kW gearløs vindmølle, istedet for een på 1500kW. (Der skal benyttes 5 og ikke 3 generatorer, fordi vindmøllens nominelle omløbstal reduceres fra 35.5rpm til 20.5rpm, når den nominelle effekt øges fra 500kW til 1500kW).

	System 1 500kW	System 2 5*system 1	System 3 1500kW	Forskel
Omløbstallet n [rpm]	35.5	20.5	20.5	
Antal maskiner	1	5	1	
Nominel effekt P_{nom} [kW]	522	5*293=1463	1501	
Kobbertab P_{cu} [kW]	20.7	5*20.7=104	52	50.1 %
Jerntab P_{fe} [kW]	5.9	5*2.9=15	11	21.4 %
Virkningsgrad [%]	95.2	92.5	96.0	-3.8 %
Vægt kobber [kg]	523	5*523=2615	1306	50.0 %
Vægt rotor- og statorjern [kg]	4079	5*4079=20395	13814	32.3 %
Vægt keramiske magneter [kg]	1136	5*1136=5680	5225	8.0 %
Vægt total [kg]	11000	5*11000=55000	40000	27.3 %

Tabel 4.7. Sammenligning af at anvende flere små generatorer versus een stor.

Det ses af tabel 4.6, at materialeforbruget stiger, og virkningsgraden falder, når der benyttes 5 mindre maskiner i stedet for een stor. Det virker derfor ikke umiddelbart særlig attraktivt at anvende flere mindre generatorer i stedet for een stor.

5 Konklusion

I de senere år har der været en stigende interesse for vindmøller uden gear, og formålet med denne rapport er at undersøge og belyse anvendelsen af mangepolede generatorer som er direkte forbundet til vindmøllens hovedaksel.

Først er de grundlæggende designkrav til transmissionssystemet for en vindmølle opstillet. Konklusionen af denne undersøgelse er, at synkrongeneratoren er den mest egnede maskine som direkte drevet vindmøllegenerator. Synkronmaskinen findes både med viklet rotor og med permanente magneter. På trods af, at fx. Enercon anvender en synkrongenerator med viklet rotor i deres gearløse vindmølle, er der flere forhold, som indikerer, at fremtidens direkte drevet vindmøllegenerator bliver med permanente magneter.

- Tabene i transmissionssystemet reduceres, hvorved årsproduktionen for vindmøllen stiger, når feltviklingen for en given generator udskiftes med permanente magneter.
- En generator med permanente magneter kan laves med mindre yderdiameter end en maskine med viklet rotor for samme virkningsgrad, hvilket både har betydning ved fabrikationen og transporten af generatoren.
- Prisen på permanente magneter er faldende, og det må derfor forventes, at prisforskellen mellem en permanent magnetiseret generator og en generator med viklet rotor reduceres.
- Virkningsgraden ved delast for en permanent magnetiseret generator er højere end for en generator med viklet rotor.

For at undersøge fremtidsperspektiverne for gearløse vindmøller er der foretaget en sammenligning af et transmissionssystem til en konventionel vindmølle (gear + asynkrongenerator) med et transmissionssystem til en gearløs vindmølle (synkrongenerator + frekvensomformer). I sammenligningen er følgende undersøgt: Generatorens fysiske størrelse, vægten af generatoren, virkningsgraden og prisen for generatoren. I følge denne sammenligning er der flere grunde til, at det tilsyneladende ikke er attraktivt på nuværende tidspunkt at skifte fra den konventionelle gear/generator løsning til den gearløse løsning.

- Prisen for gearet og generatoren til en konventionel vindmølle er noget mindre end prisen for en mangepolet synkrongenerator med tilhørende frekvensomformer til en gearløs vindmølle (≈ 525.000 i 1994 DKK for en 500kW vindmølle) .
- For gearløse vindmøller over 750kW kan der opstå transportmæssige problemer pga. generatorens meget store yderdiameter.

Det er pt. ikke økonomisk attraktivt at skifte teknologi; men dette forhold vil måske ændre sig indenfor nogle år, fordi der både foregår udvikling indenfor nye typer af permanente magneter og effekthalvledere. Dette vil formodentlig medføre en reduktion af prisen for generatorer og frekvensomformere til gearløse vindmøller.

I sammenligningen med en konventionel vindmølle forventes det, at en gearløs vindmølle har flere fordele:

- Bedre og mere veldefineret holdbarhed og mindre vedligeholdelsesudgifter.
- Forbedret spændingskvalitet på elnettet, da både den aktive og reaktive effekt kan kontrolleres.
- Der er uden ekstra omkostninger mulighed for variabelt omdrejningstal, hvilket ved reduceret last øger vindmøllens effektivitet, reducerer den aerodynamiske støj fra vingerne, og reducerer lasterne.

De to sidste punkter skyldes frekvensomformerer, og kan derfor også opnås for en konventionel vindmølle ved at koble den til elnettet via en frekvensomformer. Generatoren og frekvensomformerer til en 500kW gearløs vindmølle er kun ca. 175.000 kr. (1994 DKK) dyrere end gearet, generatoren og frekvensomformerer til en "konventionel" vindmølle med variabelt omdrejningstal. Så for vindmøller med variabelt omdrejningstal kan det allerede på kort sigt blive økonomisk attraktivt at anvende den gearløse løsning istedet for den konventionelle gear/generator løsning.

Referencer

- 1: Levi, E. (1984). Polyphase Motors. A Direct Approach to Their Design. John Wiley & Sons 1984. ISBN 0-471-89866-X
- 2: Krabbe U. (1993). Vindmøllegenerator. Direktekobling til mølleakslen.
- 3: Spooner E., A.C. Williamson and L. Thompson (1994). Direct-drive, grid-connected, modular permanent-magnet generators. BWEA 94.
- 4: Alm E. (1931). Elektromaskinläre. Bonnier Förlag 1931
- 5: Walker J. H. (1981). Large Synchronous Machines. Design, Manufacture, and Operation. Clarendon Press 1981. ISBN 0-19-859364-3
- 6: Richter R. (1951). Elektrische Maschinen. Birkäuser Verlag 1951.
- 7: Klamt J. (1962). Berechnung und Bemessung elektrischer Maschinen. Springer Verlag 1962.
- 8: Miller T. J. E. (1993). Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives. Clarendon Press 1993. ISBN 0-19-859369-4
- 9: Miller T. J. E. (1993). Switched Reluctance Motors and Their Control. Clarendon Press 1993. ISBN 0-19-859387-2
- 10: Frandsen S. (1995). Variabel Hastighedsmølle. Intern Risø note 1995.
- 11: Weh H. (1991). Synchronous Machines with New Topologies. Technische Universität Braunschweig 1991.
- 12: Weh H., H. Hoffmann and J. Landrath (1988). New Permanent Magnet excited Synchronous Machine with high efficiency at low Speed. ICEM 88
- 13: Torrey D. A. (1993). Variable-Reluctance Generators in Wind-Energy Systems. Power Electronics Specialists Conference Seattle 1993.
- 14: Torrey D. A. and S. E. Childs (1993). Development of Variable-Reluctance Wind Generators. Windpower 93.
- 15: Alatalo M. and T. Svensson (1993). Variable Speed Direct-Driven PM-generator with a PWM controlled Current Source Inverter. European Community Wind Energy Conference 1993.
- 16: Xu. L. and Y. Yang (1993). A high efficiency variable Speed Wind-power generating System using Doubly-excited Brushless Reluctance Machine. AWEA 93.
- 17: Rasmussen P., N. Vilsboell and A. Larsen (1993). Multipole, Permanent Magnet Generator studies and planned Prototypes. European Community Wind Energy Conference 1993.
- 18: Mohan N., T. Undeland and W. Robbins (1989). Power Electronics: Conver-

- ters, Applications and Design. John Wiley & Sons 1989. ISBN 0-471-50537-4.
- 19: Pierik J. T. G., A. T. Veltman, S. W. H. de Haan, G. A. Smith, D. G. Infield and A. D. Simmons (1994). A new Class of Converters for Variable Speed Wind Turbines. EWEA 1994.
- 20: Tremmel G. (1994). Wind Energy. ABB Review 6/7 1994. ABB Industrietechnik AG, D-68819 Lampertheim
- 21: Tsiolis S. (1993). Asynkrongenerator och frekvensomriktare för drift av vindkraftverk med variabelt varvtal. Vasastadens Bokbinderi AB 1993. ISBN 91-7032-971-0.
- 22: Andersen P. S., U. Krabbe, P. Lundsager and H. Petersen (1980). Basismateriale for Beregning af Propelvindmøller. Risø-M-2153. ISBN 87-550-0647-7

A Symbolliste

A	Overfladearealet for generatoren	[m ²]
A _{rotor}	Det bestrøgne areal = $\pi \cdot (D_{\text{rotor}}/2)^2$	[m ²]
B _d	Fluxtætheden i magneterne i det arbejds punkt hvor energiindholdet er størst	[T]
B _f	Effektivværdien af fluxtætheden i luftgabet	[T]
B _m	Fluxtætheden i magneterne	[T]
B _r	Remanensen	[T]
C _p	Effektkoefficienten	[]
D	Luftspaltdiameteren	[m]
D ₀	Yderdiameteren	[m]
D _{rotor}	Rotordiameteren	[m]
E	Effektivværdien af polhjulsspænding	[V]
E _m	Energiindholdet i magneterne	[J]
f _s	Statorfrekvensen = $p \cdot n/60$	[Hz]
g	Den mekaniske luftgabslængde	[m]
H _c	Koercitivitet feltstyrken	[A/m]
H _d	Feltstyrken i magneterne i det arbejds punkt, hvor energiindholdet er størst	[A/m]
H _m	Den magnetiske feltstyrke i magneterne	[A/m]
I _s	Effektivværdien af statorstrømmen	[A]
J	Effektivværdien af strømtætheden i statorviklingen	[A/m ²]
J _f	Effektivværdien af strømtætheden i feltviklingen	[A/m ²]
K	Effektivværdien af strømbelægningen	[A/m]
k _{cu}	kobberfyldfaktoren (≈ 0.5)	[]
k _{PMcu}	Pris pr. m ³ magneter / pris pr. m ³ kobber	[]
L	Maskinens aktive længde	[m]
m _d	Drejningsmomentet	[Nm]
n	Omløbstallet	[rpm]
n _{nom}	Nominelle værdier	[]
p	Polpar antallet	[]
P	Den aktive effekt	[W]
P _{CU}	Kobbertabet	[W]
P _{FE}	Jerntabet	[W]
R _l	Statormodstanden	[Ω]
S	Den tilsyneladende effekt	[VA]
U _s	Statorspændingen også kaldet klemspændingen	[V]
v ₀	Vindhastigheden	[m/s]
V _{bore}	Borevolumen = $\pi \cdot (D/2)^2 \cdot L$	[m ³]
V _{CU}	Kobbervolumen	[m ³]
V _{FE}	Jernvolumen	[m ³]
V _m	Magnetvolumen	[m ³]
γ	Fasevinklen mellem polhjulsspænding E og fasestrømmen I _s	[]
ε	Skaleringsfaktor	[]
η	Virkningsgraden	[%]
ι	Spredningskoefficient permanente magneter ($1.10 \leq \iota \leq 1.25$)	[]
ρ	Luftensmassefylde (1.225kg/m ³)	[kg/m ³]
τ	Poldelingen $\pi \cdot D/(2p)$	[m]
Ψ	Flux pr. pol (effektivværdi)	[Wb]
ω	Vinkelhastigheden = $2 \cdot \pi \cdot n/60$	[rad/s]
φ	Fasevinklen mellem statorspændingen U _s og fasestrømmen I _s	[]

B Magneter

Dette appendix omhandler forskellige typer af permanente magneter til PM-generatorer. Det er endvidere vist, hvordan permanente magneter udnyttes optimalt, da de er relative kostbare. Disse resultater er anvendt i designet af PM-generatorerne i appendix F.

Den aktive volume for en generator er givet ved:

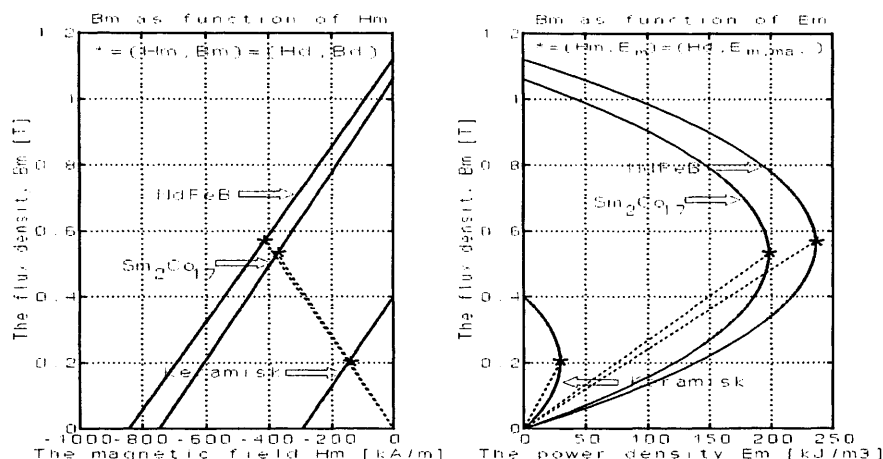
$$\begin{aligned}
 P_{nom} &= m_{d,nom} \omega_{nom} \propto B_f K V_{bore} \omega_{nom} \\
 K &\propto B_f \\
 \Downarrow \\
 V_{bore} &\propto \frac{P_{nom}}{B_f^2 n_{nom}}
 \end{aligned} \tag{B.1}$$

hvor det er antaget, at strømbelægningen K er proportional med flux-tætheden B_f i luftgabet (appendix F).

Derefter antages det, at luftgabslængden stiger lineært med luftspaltdiameteren (appendix C), hvorfor magnetvolumen er givet ved:

$$\begin{aligned}
 V_m &\propto \frac{B_f^2}{E_m} D L g \\
 g &\propto D \quad \Rightarrow \\
 V_m &\propto \frac{B_f^2}{E_m} V_{bore}
 \end{aligned} \tag{B.2}$$

Magnetvolumen (V_m) er derfor proportional med luftgabsinduktionen i anden (B_f^2), generatorens aktive volume (V_{bore}) og omvendt proportional med magneternes energiindhold ($E_m = -H_m \cdot B_m$). Energiindholdet E_m er vist i figur B.1 som funktion af den magnetiske feltstyrke (H_m) i magneternes arbejds punkt for tre typiske materialer: Keramiske magneter (hård ferrit, Barium-Ferrit), Samarium-Cobolt magneter ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) og Neodymium magneter (NdFeB).



Figur B.1 Flux-tætheden B_m og energiindholdet E_m som funktion af den magnetiske feltstyrke H_m .

Af figur B.1 ses det, at når $(H_m, B_m) \approx (H_d, B_d)$ er energiindholdet E_m maximal og magnetvolumen minimalt. De væsentligste størrelser, der karakteriserer de tre magnettyper, som kunne tænkes anvendt i en mangepolet direkte drevet PM-generator til vindmøller, er vist i tabel B.1.

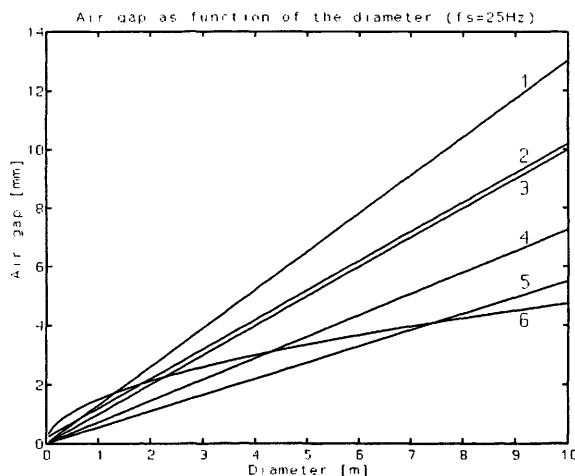
	Barium-Ferrit	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	NdFeB
Remanens B_r	0.40 T	1.06 T	1.12 T
Koercitivfeltstyrke $= -H_c$	294 kA/m	748 kA/m	844 kA/m
Max energi $E_{m, \max}$	29.4 kJ/m ³	198 kJ/m ³	236 kJ/m ³
Vægt / volume	4800 kg/m ³	8200 kg/m ³	7200 kg/m ³
Pris pr. kg	57 kr/kg	1050 kr/kg	875 kr/kg
Pris pr. kg / Max energi	9.3 kr/J	43.5 kr/J	26.7 kr/J

Tabel B.1. Karakteristika for permanente magneter, som kunne tænkes anvendt i mangepoledede PM-generatorer til gearløse vindmøller.

Af tabel B.1 ses det, at det på nuværende tidspunkt er økonomisk mest fordelagtigt at vælge keramiske magneter, fordi forholdet mellem kiloprisen og den maximale energiindhold er mindst. Desværre er energiindholdet pr. kg lavt for keramiske magneter, hvilket medfører, at en mangepolet direkte drevet PM-generator med keramiske magneter bliver betydelig tungere end en mangepolet direkte drevet PM-generator med NdFeB-magneter (se afsnit 4.4).

C Luftgab

Det ses af formel B.2 (appendix B), at magnetvolumenet stiger proportionalt med luftgabet. Der er i litteraturen beskrevet forskellige udtryk for, hvordan luftgabslængden kan og bør vælges for en elektrisk maskine, hvilket er vist i figur C.1.

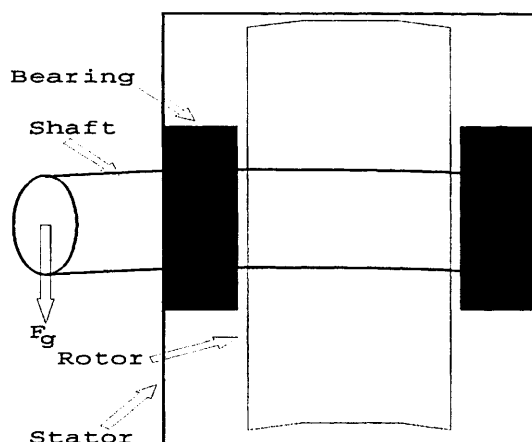


Figur C.1 Luftgabslængden som funktion af luftspaltdiameteren.

Af figur C.1 ses det, at der er stor forskel på de 6 forskellige explicite udtryk, hvilket kan skyldes, at:

- 1: formel 2 (Krabbe 1993) og 3 (Richter 1951) er fra henholdsvis 30'erne og 40'erne og formel 1, 4 og 5 er fra 80'erne (Levi 1984),
- 2: formel 1 og 3 er for en synkronmaskine med viklet rotor, hvor man ofte med fordel kan vælges et større luftgab pga. reaktanserne,
- 3: formel 4, 5 og 6 (Levi 1984) er for asynkronmaskiner med kortslutningsrotor, hvor det er vigtig at den gensidige induktans er stor, hvilket kræver et lille luftgab,
- 4: der er anvendt forskellige polpar antal (formel 1: $p=13$, formel 4: $p=42$ og formel 5: $p=73$), og
- 5: der er endnu ingen produktionserfaringer med mangepolede maskiner. Udover Enercon er der ingen firmaer, som fremstiller mangepolede vindmøllegeneratorer over 50 kW, og det er ikke sikkert, at de explicite udtryk i figur C.1 gælder for mangepolede direkte drevne vindmøllegeneratorer.

De magnetiske kræfter har i følge Siemens Nürnberg (Dr. Georg Möller) stor indflydelse på valget af luftgabslængden. Dette er skitseret i figur C.2, hvor der er vist en maskine, hvor luftgabslængden varierer langs stator periferien.



Figur C.2 Princip skitse til illustration af udbøjning. F_g er kraften på akslen hidrørende fra vingerotoren.

Virkningen af luftgabsvariationen er udregnet i tabel C.1, hvor de magnetiske kræfter er vist for to næsten identiske direkte drevne vindmøllegeneratorer (1500kW, $n_{\text{nom}}=20.5$ rpm og $p=72$ polpar). Forskellen mellem de to generatorer er middelværdien af luftgabslængden.

	Maskine 1	Maskine 2
Flux-tætheden i luftgab B_r	0.8 T	0.8 T
Luftspaltdiameteren D	6.9 m	6.9 m
Den aktive længde L	31.4 cm	31.4 cm
Middel luftgabslængde g_{ave}	7.0 mm	4.0 mm
Minimum luftgabslængde g_{min}	5.0 mm	2.0 mm
Den totale statorvægt	11000 kg	11000 kg
Summen af de magnetiske kræfter ΣF	199 kN	351 kN

Tabel C.1. Data for to 1500kW direkte drevne vindmøllegeneratorer med forskellig middel luftgabslængde.

Som det er forventet, vokser summen af de magnetiske kræfter ved samme udbøjning (2 mm), når middel luftgabslængden reduceres. Endvidere ses det, at for begge maskiner er de magnetiske kræfter noget større end tyngdekraften på statoren.

I praksis vil det være næsten umuligt at fremstille en maskine med 6.9 m luftspaltdiameter og kun 4.0 mm luftgab, da kravene til produktionsnøjagtighed bliver vanskelig at opfylde.

Luftgabslængden er derfor et kompromis mellem:

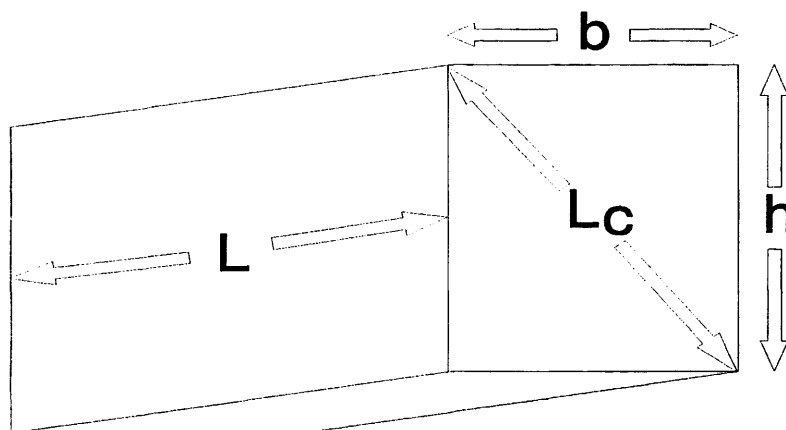
- 1: Luftspaltdiameteren
- 2: Tyngdekraften og de magnetiske kræfter
- 3: Lejerne, akslen og rammen
- 4: Termisk udvidelse

- 5: Forbrug af materialer
- 6: Flux-tætheden i luftgabet
- 7: Reaktanserne
- 8: Produktionstolerancer

I denne rapport er luftgabet g valgt til $D/1000$ (kurve 3 i figur C.1) for de direkte koblede generatorer. Dette valg er gjort, fordi det i følge Siemens (Ing. Joachim Fraunhofer) og Schorch ikke er hensigtsmæssig pga. produktionstolerancer at vælge luftgabet mindre for en maskine, hvor statoren skal opbygges i sektioner ($D > 2.0\text{m}$).

D Transport

Dette appendix omhandler muligheder og begrænsninger for at transportere en mangepolet direkte drevet vindmøllegenerator. Konventionelle vindmøller transporteres normalt i 40 fods container, fordi det er nemt og billigt. Omridset af en standard 40 fods container er vist i figur D.1.



Figur D.1 Omridset af en standard 40 fods container

hvor

Længde $L=12\text{m}$, bredde $b=2.35\text{m}$, højde $h=2.55\text{m}$ og diagonallængde $L_c=3.46\text{m}$

Ud fra diagonallængden og højden kan det ses, at maskinens yderdiameter kan vælges op til ca. 3.0m, hvis generatoren skal kunne transporteres i en 40 fods container. Ved større maskiner er det nødvendigt at transportere generatoren på en blokvogn. Afhængig af bredden kan transporten enten foregå uden eller med politieskorte.

Uden politieskorte er:

Max. bredde $b=2.35\text{m}$, max. højde $h=3.50\text{m}$ og max. diagonallængde $L_c=4.22\text{m}$

og med politieskorte er:

Max. bredde $b=4.00\text{m}$, max. højde $h=3.50\text{m}$, max. diagonallængde $L_c=5.32\text{m}$

Der er derfor muligt at transportere maskiner med yderdiameter op til henholdsvis ca. 4.0m og ca. 5.0m afhængig af, om transporten foregår uden eller med politieskorte.

For endnu større maskiner er det ofte nødvendig at samle generatoren på det sted, hvor den skal stå, hvilket øger omkostningerne betragtelig, fordi

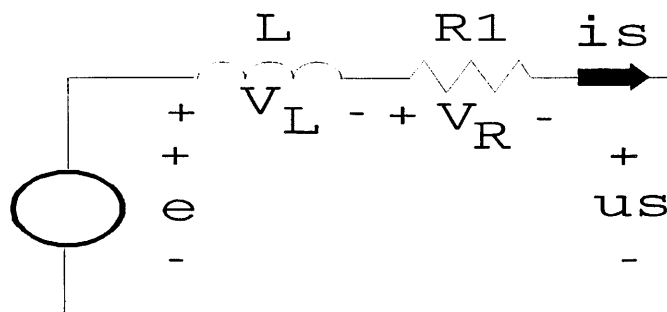
- 1: der kræves tungt specialværktøj, som også skal transporteres, og
- 2: generatoren skal først samles og testes på fabrikken, hvorefter den skal skilles ad, og samles igen på stedet.

Det er derfor af økonomiske grunde tilrådelig at designe de mangepoledede direkte drevne vindmøllegeneratorer, så deres yderdiameter bliver mindst muligt.

E Virkningsgraden for en mangepolet direkte drevet PM-generator sammenlignet med en 4-polet asynkrongenerator

I dette appendix sammenlignes virkningsgraderne for en standard 4-polet asynkrongenerator med en mangepolet direkte drevet PM-generator. For at kunne foretage denne sammenligning er det nødvendigt at kende de elektriske tab i maskinerne, hvilket er udregnet ud fra generatorernes ækvivalentdiagrammer.

Ækvivalentdiagrammet for en PM-maskine er vist i figur E.1.

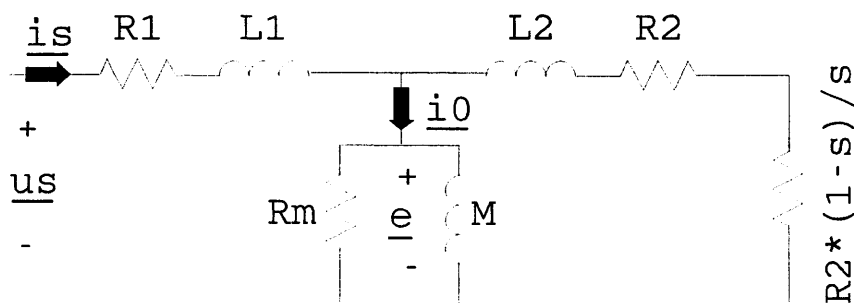


Figur E.1 Ækvivalentdiagram for en PM-generator.

hvor L er summen af spredningsinduktansen og den synkrone induktans, R_1 er viklingsmodstanden, E er polhjulsspændingen, U_s er statorspændingen (klemspændingen), og i_s er statorstrømmen.

I dette appendix benyttes følgende værdier: $P_{\text{nom}}=500\text{kW}$, $n_{\text{nom}}=35.5\text{rpm}$, $p=42$, $f_{s,\text{nom}}=24.9\text{Hz}$, $E_{\text{nom}}=380.5\text{V}$, $R_1=26.6\text{m}\Omega$ og $L=2.27\text{mH}$.

Ækvivalentdiagrammet for en standard 4-polet asynkrongenerator er vist i figur E.2.



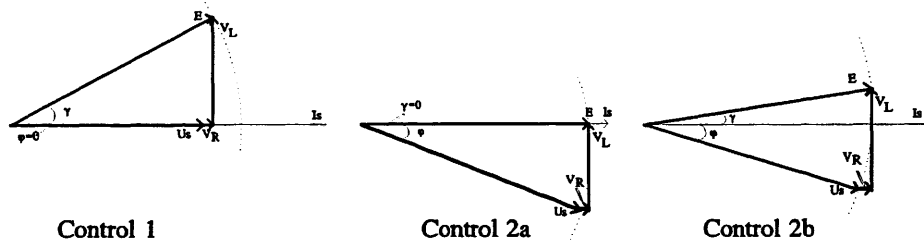
Figur E.2 Ækvivalentdiagram for en asynkrongenerator.

hvor R_1 er statormodstanden, R_2 er rotormodstanden, R_m repræsenterer jerntabet, L_1 er spredningsinduktansen i statoren, L_2 er spredningsinduktansen i rotoren og M er den

gensidige induktans.

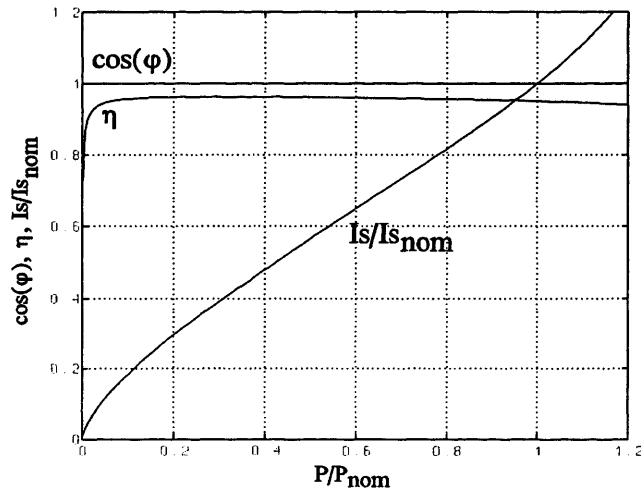
Der benyttes følgende nominelle værdier: $P_{\text{nom}}=500\text{kW}$, $n_{\text{nom}}=1528\text{rpm}$, $p=2$, $f_{s,\text{nom}}=50\text{Hz}$, $U_{s,\text{nom}}=400\text{V}$, $E_{\text{nom}}=413.0\text{V}$, $R_1=5.0\text{m}\Omega$, $R_2=16.0\text{m}\Omega$, $R_m=105\Omega$, $L_1=232\mu\text{H}$, $L_2=382\mu\text{H}$, $M=12.7\text{mH}$.

Da PM-generatoren skal forbindes til en frekvensomformer kan der anvendes forskellige styrestrategier, hvoraf to er vist i figur E.3.



Figur E.3 Vektordiagrammer (strømme og spændinger) for de to styrestrategier af PM-generatoren.

Når Control 1 i figur E.3 anvendes, er $\cos(\varphi)=1$ (statorstrømmen i fase med statorspændingen), og resultaterne med denne styrestrategi er vist i figur E.4.

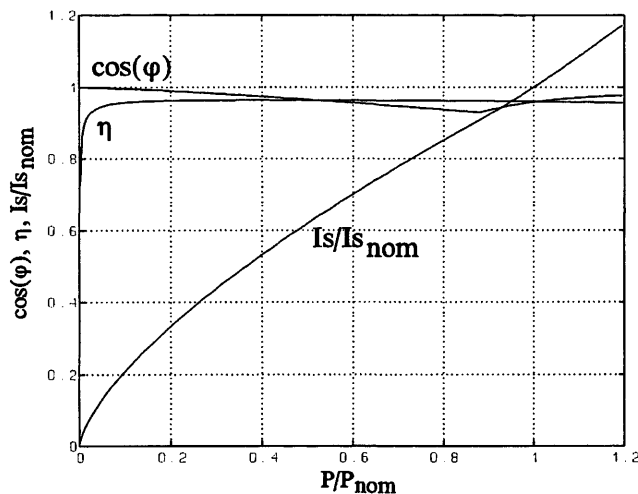


Figur E.4 Virkningsgraden, $\cos(\varphi)$ og $I_s/I_{s,\text{nom}}$ som funktion af effekten når PM-generatoren styres efter Control strategi 1.

hvor $I_{s,\text{nom}}=522\text{A}$, $U_{s,\text{nom}}=318.9\text{V}$, $\cos(\varphi_{\text{nom}})=1$ og $\eta_{\text{nom}}=95.0\%$.

Når der anvendes en ægte firekvadrant frekvensomformere (Afsnit 3.3, figur 3.2) kan $\cos(\varphi)$ kontrolleres, hvilket er benyttet i Control 2a figur E.3, hvor I_s styres, så den er i fase med E , fordi kobbertabet derved minimeres. Når effekten stiger, skal U_s øges,

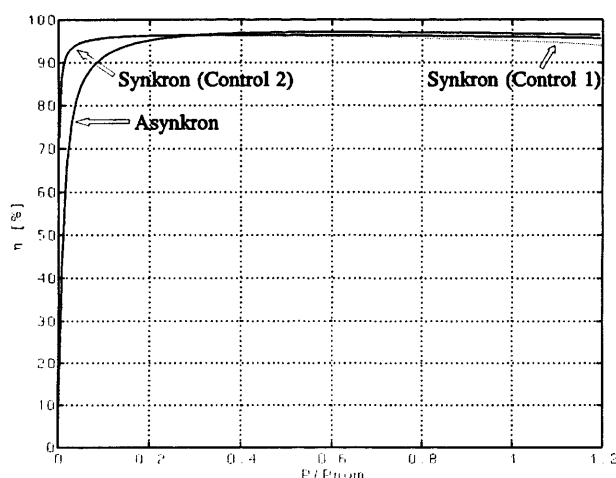
hvilket fortsætter indtil U_s bliver lig E_{nom} , hvorefter I_s drejes i forhold til E (se Control 2b, figur E.3). Resultaterne, når Control 2 anvendes, er vist i figur E.5.



Figur E.5 Virkningsgraden, $\cos(\varphi)$ og $I_s/I_{s,\text{nom}}$ som funktion af effekten når PM-generatoren styres efter Control strategi 2.

hvor $I_{s,\text{nom}}=456\text{A}$, $U_{s,\text{nom}}=380.5\text{V}$, $\cos(\varphi_{\text{nom}})=0.958$ og $\eta_{\text{nom}}=96.0\%$.

Ved fuldlast er virkningsgraden ca. 1% højere (96.0% kontra 95.0%), når Control 2 anvendes i stedet for Control 1. I figur E.6 ses virkningsgraden for en 500kW mangepolet direkt drevet PM-generator og for en 4-polet 500kW asynkrongenerator.



Figur E.6 Virkningsgraden som funktion af effekten for en direktekoblet PM-generator og en standard 4-polet asynkrongenerator.

Det ses, at ved fuldlast er virkningsgraden for asynkrongeneratoren ca. 1% større end for PM-generatoren. Men under 30% af fuldlast er virkningsgraden for PM-generatoren højere end virkningsgraden for asynkrongeneratoren.

F Beregningsresultater

Dette appendix indeholder beregningsresultater for de vindmøllegeneratorer, som er benyttet i denne rapport.

Af formel B.1 i appendix B ses det, at den nominelle effekt for en elektrisk maskine afhænger af flux-tætheden i luftgabet B_f , strømbelægningen K langs statorperiferien, maskinens aktive volumen V_{bore} og maskinens omløbstal n .

I beregningerne er det antaget:

- at omløbstallet for generatoren er givet ud fra den maksimale tiphastighed (formel 2.3 afsnit 2.1),
- at flux-tætheden B_f ikke kan hæves vilkårligt, pga. mætning, og
- at strømbelægningen K ikke kan hæves vilkårligt, bla. pga. kølingen

Det er derfor antaget, at flux-tætheden B_f og strømbelægningen K er begrænset til:

$$\begin{aligned} \frac{K}{B_f} &\approx 55 \text{ A/mm T}^{-1} \\ 0.6 \text{ T} &\leq B_f \leq 0.9 \text{ T} \\ \Downarrow \\ 30 \text{ A/mm} &\leq K \leq 50 \text{ A/mm} \end{aligned} \tag{F.1}$$

For generatorerne til de gearløse vindmøller er det desuden valgt at benytte lavere strømtæthed i synkronmaskinen med viklet rotor (1.8 A/mm^2) end i PM-generatorerne (4.0 A/mm^2) for derved at opnå omtrent samme virkningsgrad for de to generatortyper.

I beregningerne udregnes vægten for den aktive masse, som består af statorblik, rotorjern, kobber og evt. permanente magneter. Generatorens samlede vægt er vægten af de aktive materialer plus vægten af statorhus, aksel, lejer og forbindelse mellem aksel og den magnetiske aktive del af rotoren. For synkronmaskinen med viklet rotor skal endvidere tillægges vægten af udstyret til overførsel af strømmen til magnetiseringskredsløbet i rotoren (fx. roterende transformer + dioder). Den samlede vægt for generatorerne er ikke udregnet i dette appendix, fordi den afhænger af konstruktionsprincipper og materiale valg.

I beregningerne af priserne for de aktive materialer er der anvendt 1994 priser for jern, kobber og permanente magneter.

	Blik	Kobber	Keramiske magneter	NdFeB mag- neter
Pris pr. kg [DKK/kg]	10	35	57	875

Tabel F.1. Materialepriser til generatorer (1994).

Begrundelsen for at udregne priserne for de aktive materialer er, at det giver et estimat for generatorens samlede pris - omend den samlede pris må forventes betydelig større end prisen for de aktive materialer.

Mangepolede direkte drevne vindmøllegeneratorer med keramiske magneter

$B_m = 0.40\text{T}$, $-H_c = 294\text{kA/m}$, $B_f = 0.80\text{T}$, $K = 45\text{A/mm}$, $J = 4.0\text{A/mm}^2$, $L/\tau = 2.0$
og $g = D/1000$

P [kW]	104	300	504	702	904	1104	1302	1486
n [rpm]	79.4	45.5	35.5	30.0	26.8	23.8	22.1	20.5
p	19	33	42	50	56	63	68	73
D _o [m]	1.39	2.61	3.61	4.42	5.20	5.85	6.48	7.04
D [m]	1.20	2.40	3.40	4.20	4.97	5.62	6.25	6.80
L [m]	0.20	0.23	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30
S [kVA]	128	338	581	774	995	1179	1388	1580
E [V]	485	447	457	438	437	427	424	426
U _s [V]	405	395	397	398	396	400	398	400
I _s [A]	87.7	252	424	589	759	920	1091	1236
P _{cu} [kW]	6.6	15.4	21.7	30.1	33.8	40.2	46.7	52.6
P _{fe} [kW]	1.0	2.4	3.9	5.1	6.2	7.5	8.7	10.0
η [%]	93.2	94.3	95.0	95.3	95.6	95.8	95.9	95.9
W _m [kg]	118	500	1088	1711	2482	3243	4105	4989
W _{cu} [kg]	155	352	532	673	830	949	1075	1188
W _{fe} [kg]	1247	3268	5439	7004	8447	9828	10823	12081
W _{aktiv} [kg]	1520	4120	7059	9388	11759	14020	16003	18258
Pris [DKK]	24621	73500	135026	191122	254994	316346	379840	446763

Tabel F.2. Beregningseksempel for mangepolede direkte drevne PM-generatorer med keramiske magneter

Mangepolede direkte drevne vindmøllegeneratorer med keramiske magneter

$B_m = 0.40T$, $-H_c = 294kA/m$, $B_r = 0.80T$, $K = 45A/mm$, $J = 4.0A/mm^2$, $L/\tau = 4.0$
og $g = D/1000$

P [kW]	102	289	494	687	934	1089	1306	1471
n [rpm]	79.4	45.5	35.5	30.0	26.8	23.8	22.1	20.5
p	19	33	42	50	56	63	68	73
D _o [m]	1.12	2.09	2.89	3.52	4.13	4.66	5.16	5.62
D [m]	0.95	1.90	2.70	3.33	3.93	4.47	4.96	5.42
L [m]	0.31	0.36	0.40	0.42	0.44	0.45	0.46	0.47
S [kVA]	123	341	555	764	1003	1166	1394	1572
E [V]	470	488	445	467	429	430	429	443
U _s [V]	398	410	399	420	401	401	402	415
I _t [A]	87.5	233	416	545	779	904	1083	1183
P _{cu} [kW]	6.3	14.8	21.9	29.0	33.9	39.6	45.7	51.4
P _{fe} [kW]	1.1	2.8	3.8	5.5	7.0	8.2	9.7	10.8
η [%]	93.1	94.4	95.0	95.3	95.7	95.8	95.9	96.0
W _m [kg]	122	516	1098	1720	2526	3268	4168	4980
W _{cu} [kg]	161	376	537	680	920	1046	1177	1290
W _{fe} [kg]	1310	3317	5600	7229	9012	10112	11571	12444
W _{aktiv} [kg]	1593	4209	7235	9629	12458	14426	16916	18714
Pris [DKK]	25689	75742	137381	194130	266302	324006	394481	453450

Tabel F.3. Beregningseksempel for mangepolede direkte drevne PM-generatorer med keramiske magneter

Mangepolede direkte drevne vindmøllegeneratorer med NdFeB magneter

$B_m = 1.12\text{T}$, $-H_c = 844\text{kA/m}$, $B_f = 0.80\text{T}$, $K = 45\text{A/mm}$, $J = 4.0\text{A/mm}^2$, $L/\tau = 2.0$
og $g = D/1000$

P [kW]	102	294	502	702	902	1104	1304	1491
n [rpm]	79.4	45.5	35.5	30.0	26.8	23.8	22.1	20.5
p	19	33	42	50	56	63	68	73
D _o [m]	1.39	2.61	3.61	4.42	5.20	5.85	6.48	7.04
D [m]	1.20	2.40	3.40	4.20	4.97	5.62	6.25	6.80
L [m]	0.20	0.23	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30
S [kVA]	128	340	581	771	995	1170	1384	1581
E [V]	485	450	457	437	437	424	423	426
U _s [V]	391	388	396	398	395	400	398	401
I _s [A]	87.7	252	424	588	759	920	1091	1237
P _{cu} [kW]	6.6	15.4	21.6	30.1	33.8	40.2	46.7	52.6
P _{fe} [kW]	1.0	2.4	3.9	5.0	6.2	7.5	8.8	10.0
η [%]	93.0	94.3	95.0	95.3	95.6	95.8	95.9	95.9
W _m [kg]	22.5	94.5	202.5	319.5	463.5	606.0	768.0	930.0
W _{cu} [kg]	156	352	532	673	830	949	1074	1188
W _{fe} [kg]	791	2008	3404	4474	5657	6661	7712	8772
W _{aktiv} [kg]	970	2455	4139	5467	6951	8216	9554	10890
Pris [DKK]	33057	115087	229848	347858	491182	630075	786710	943050

Tabel F.4. Beregningeksempel for mangepolede direkte drevne PM-generatorer med NdFeB magneter

Mangepolede direkte drevne vindmøllegeneratorer med NdFeB magneter

$B_m = 1.12T$, $-H_c = 844kA/m$, $B_r = 0.80T$, $K = 45A/mm$, $J = 4.0A/mm^2$, $L/\tau = 4.0$
og $g = D/1000$

P [kW]	102	297	485	675	918	1083	1295	1470
n [rpm]	79.4	45.5	35.5	30.0	26.8	23.8	22.1	20.5
p	19	33	42	50	56	63	68	73
D _o [m]	1.11	2.08	2.89	3.52	4.13	4.67	5.16	5.62
D [m]	0.95	1.90	2.70	3.33	3.93	4.47	4.96	5.42
L [m]	0.31	0.36	0.40	0.42	0.44	0.45	0.46	0.47
S [kVA]	119	346	540	749	980	1157	1382	1570
E [V]	453	493	433	457	420	426	425	442
U _s [V]	393	423	391	413	394	399	399	415
I _s [A]	87.6	234	416	546	778	905	1084	1184
P _{cu} [kW]	6.3	14.8	21.9	28.9	33.8	39.6	45.7	51.4
P _{fe} [kW]	1.0	2.8	3.8	5.3	6.8	8.0	9.6	10.8
η [%]	93.1	94.4	95.0	95.3	95.7	95.8	95.9	96.0
W _m [kg]	23.0	96.0	207.0	323.0	468.0	614.0	773.0	935.0
W _{cu} [kg]	161	376	537	680	920	1046	1177	1290
W _{fe} [kg]	866	2170	3722	4827	6208	7198	8348	9329
W _{aktiv} [kg]	1050	2642	4466	5830	7596	8858	10298	11554
Pris [DKK]	34420	118860	237140	354695	503780	645840	801050	956565

Tabel F.5. Beregningeksempel for mangepolede direkte drevne PM-generatorer med NdFeB magneter

4-polede PM-generatorer med NdFeB magneter

$B_m = 1.12\text{T}$, $-H_c = 844\text{kA/m}$, $B_r = 0.80\text{T}$, $K = 45\text{A/mm}$, $J = 4.0\text{A/mm}^2$,
 $L/\tau = 1.27$ og $g = 2 \cdot 10^{-4} + D/250$

P [kW]	97	297	501	697	905	1073	1305	1498
n [rpm]	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
p	2	2	2	2	2	2	2	2
D ₀ [m]	0.51	0.71	0.82	0.91	0.99	1.05	1.10	1.15
D [m]	0.24	0.35	0.42	0.47	0.51	0.55	0.58	0.61
L [m]	0.24	0.35	0.42	0.47	0.51	0.55	0.58	0.61
S [kVA]	117	365	603	864	1139	1373	1610	1871
E [V]	495	490	494	493	503	513	475	525
U _s [V]	408	400	410	398	400	401	385	420
I _s [A]	78.7	248	407	584	755	892	1130	1188
P _{cu} [kW]	1.8	3.5	4.8	6.0	7.1	8.0	8.8	9.7
P _{fe} [kW]	1.2	3.3	5.3	7.4	9.5	11.3	13.1	15.0
η [%]	97.0	97.7	98.0	98.1	98.2	98.3	98.3	98.4
W _m [kg]	4.5	14.0	22.5	31.5	40.5	49.5	57.0	66.0
W _{cu} [kg]	43	85	117	145	173	194	215	237
W _{fe} [kg]	305	844	1340	1867	2430	2893	3368	3886
W _{aktiv} [kg]	353	943	1480	2044	2644	3137	3640	4189
Pris [DKK]	8493	23665	37183	51308	65793	79033	91080	104905

Tabel F.6. Beregningeksempel for 4-polede PM-generatorer med NdFeB magneter

Mangepolede direkte drevne vindmøllegeneratorer med viklet rotor

$B_r = 0.60T, K = 35A/mm, J = J_r = 1.8A/mm^2, L/\tau = 2.0$ og $g = D/1000$

P [kW]	105	300	495	699	912	1083	1304	1500
n [rpm]	79.4	45.5	35.5	30.0	26.8	23.8	22.1	20.5
p	19	33	42	50	56	63	68	73
D ₀ [m]	1.64	3.08	4.19	5.17	6.05	6.85	7.65	8.38
D [m]	1.43	2.85	3.95	4.93	5.80	6.60	7.40	8.13
L [m]	0.24	0.27	0.30	0.31	0.33	0.33	0.34	0.35
S [kVA]	221	447	634	808	1028	1171	1401	1601
E [V]	834	594	514	466	455	436	434	416
U _s [V]	399	398	401	403	404	403	404	390
I _s [A]	88.5	251	411	578	753	895	1076	1283
P _{cu} [kW]	6.2	14.3	20.7	27.2	34.2	40.9	49.1	57.0
P _{fe} [kW]	1.3	3.2	5.0	6.7	8.5	9.8	11.7	13.2
η [%]	93.3	94.5	95.1	95.4	95.5	95.5	95.5	95.5
W _{cu} [kg]	513	1372	2188	3049	3898	4725	5753	6686
W _{fe} [kg]	964	2496	4116	5716	7442	8878	10757	12470
W _{aktiv} [kg]	1477	3868	6304	8765	11340	13603	16510	19156
Pris [DKK]	27595	72980	117740	163875	210850	254155	308925	358710

Tabel F. 7. Beregningeksempel for mangepolede direkte drevne synkrogeneratorer med viklet rotor

Title and author(s)

Investigation of generator concepts for wind turbines - Direct driven generators for gearless wind turbines

Lars M. Søndergaard og Henrik Bindner

ISBN

87-550-2061-5

ISSN

0106-2840

Dept. or group

Date

Vindteknikgruppen,
Afdelingen for Meteorologi og Vindenergi

December 1995

Groups own reg. number(s)

Project/contract No.

Pages

52

Tables

18

Illustrations

27

References

22

Abstract (Max. 2000 char.)

The report describes multipole generators directly connected to the main shaft of a wind turbine. Information and results from other projects on multipole generators have been collected and evaluated in order to choose the optimal solution. Emphasis has been on wind turbines in the power range from 500 kW to 1500 kW because this will be the typical size of wind turbines in the future.

The requirements for the transmission system for a wind turbine are described. The limitations on the nominal speed of the rotor, the grid-connection and the transportations put also restrictions on the possible solutions. Similarly it is important that the transmission system is simple, robust, silent, cheap and with a high efficiency. On the basis of the specifications different types of generators are investigated and analyzed.

The preferred solution with a synchronous generator and a frequency converter is compared with a conventional gear/generator solution. The size, the weight, the efficiency and the price are also compared for the two transmission systems.

Finally the solution with a synchronous generator is compared with more exotic solutions e.g. transversal flux machine.

The project is a co-orporation between Risø and Elsamprojekt and it is financially supported by the Danish Energy Agency, j.no. 51171/93-0053 and Elsam's R&D.

Descriptors INIS/EDB

ELECTRIC GENERATORS, FEASIBILITY STUDIES, FREQUENCY CONVERTERS, POWER RANGE 100-1000 KW, WIND TURBINES, MULTIPOLE GENERATORS

Available on request from:

Information Service Department, Risø National Laboratory (Afdelingen for Informationservice, Forskningscenter Risø)

P.O.Box 49, DK-4000 Roskilde, Denmark

Phone (+45) 46 77 46 77 , ext. 4004/4005 · Telex 43 116 · Fax (+45) 46 75 56 27